

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Vedrana Lončarević**

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Prof.dr. sc. Vedran Žanić

Student:

Vedrana Lončarević

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno, koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Vedranu Žaniću te dr.sc. Stanislavu Kitaroviću na ukazanoj pomoći i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Vedrana Lončarević



## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	IX
SAŽETAK.....	XII
SUMMARY .....	XIV
1. UVOD.....	1
1.1. Osnovno o razmatranim elementima nosive konstrukcije zrakoplova .....	2
1.2. Osnovno o razmatranom materijaluzrakoplovnih konstrukcija .....	2
2. POSTOJEĆE SPOZNAJE VEZANE UZ RAZMATRANI PROBLEM .....	5
2.1. Općenita razmatranja .....	5
2.2. Elastična analiza izvijanja.....	6
2.3. Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti.....	9
2.4. Postojeća poluempirijska formulacija granične nosivosti.....	11
3. SUROGAT MODELIRANJE RAZMATRANOG MODELA .....	13
3.1. Općenita razmatranja .....	13
3.2. Plan pokusa .....	14
4. PROVEDBA RAČUNALNIH POKUSA .....	17
4.1. Općenita razmatranja .....	17
4.2. Materijalni modeli.....	17
4.3. Diskretizacija .....	20
5. ANALIZA REZULTATA RAČUNALNIH POKUSA.....	22
5.1. Formulacija projektnog izraza. ....	22

5.2. Usporedba rezultata.....	29
6. ZAKLJUČAK.....	34
7. PRILOZI.....	36
PRILOG I.....	37
PRILOG II.....	62
LITERATURA.....	103

## POPIS SLIKA

SLIKA 1.KOEFICIJENT IZVIJANJA TLAČNO OPTEREĆENIH ZAKRIVLJENIH PANELA[12].....	8
SLIKA 2 PRIKAZ RAZLIČITIH $\sigma$ - $\epsilon$ KRIVULJA ZA KORIŠTENE MATERIJALNE MODELE. ....	19
SLIKA 3 UZ DEFINICIJU OPTEREĆENJA I OGRANIČENJA POMAKA. ....	21
SLIKA 4PRIKAZ REFERENTNE ODZIVNE PLOHE ZA RAVNE PANELE ( $R=\infty$ ). ....	24
SLIKA 5PRIKAZ REFERENTNE ODZIVNE PLOHE ZA GORNJU GRANICU RAZMATRANOG RASPONA RADIJUSA ZAKRIVLJENOSTI ( $R=3250$ MM) JEDNOSTRUKO ZAKRIVLJENIH PANELA. ....	27
SLIKA 6PRIKAZ REFERENTNE ODZIVNE PLOHE ZA SREDINU RAZMATRANOG RASPONA RADIJUSA ZAKRIVLJENOSTI ( $R=2500$ MM) JEDNOSTRUKO ZAKRIVLJENIH PANELA. ....	28
SLIKA 7PRIKAZ REFERENTNE ODZIVNE PLOHE ZA DONJU GRANICU RAZMATRANOG RASPONA RADIJUSA ZAKRIVLJENOSTI ( $R=1750$ MM) JEDNOSTRUKO ZAKRIVLJENIH PANELA. ....	28

## POPIS TABLICA

TABLICA 1. VRIJEDNOSTI PARAMETARA ZA RAVNE PANELE .....	14
TABLICA 2. PLAN POKUSA-RAVNI PANELI.....	14
TABLICA 3. VRIJEDNOSTI PARAMETARA ZA ZAKRIVLJENE PANELE .....	15
TABLICA 4. PLAN POKUSA-ZAKRIVLJENI PANELI .....	15
TABLICA 5 OSNOVNE ZNAČAJKE RAZMATRANIH DISKRETIZIRANIH MODELA .....	20
TABLICA 6 OGRANIČENJA POMAKA. ....	20
TABLICA 7 RAZMATRANE ODZIVNE PLOHE ZA RAVNE PANELE.....	23
TABLICA 8 RAZMATRANE ODZIVNE PLOHE ZA ZAKRIVLJENE PANELE.....	26
TABLICA 9. USPOREDNI PRIKAZ REZULTATA ZA RAZMATRANE RAVNE PANELE. ....	30
TABLICA 10. USPOREDNI PRIKAZ REZULTATA ZA RAZMATRANE ZAKRIVLJENE PANELE. ....	33
TABLICA 11. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR100-T050. ....	38
TABLICA 12 KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR100-T050 (NASTAVAK). ....	39
TABLICA 13. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR100-T350. ....	40
TABLICA 14. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR100-T350 (NASTAVAK).....	41
TABLICA 15. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR175-T050. ....	42
TABLICA 16. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR175-T050 (NASTAVAK).....	43
TABLICA 17. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR175-T200. ....	44
TABLICA 18. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR175-T200 (NASTAVAK).....	45



---

TABLICA 19. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR175-T650. ....	46
TABLICA 20. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR175-T650 (NASTAVAK).....	47
TABLICA 21. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR250-T050. ....	48
TABLICA 22. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR250-T050 (NASTAVAK).....	49
TABLICA 23. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR250-T350. ....	50
TABLICA 24. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR250-T350 (NASTAVAK).....	51
TABLICA 25. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR325-T200. ....	52
TABLICA 26. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR325-T200 (NASTAVAK).....	53
TABLICA 27. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR325-T500. ....	54
TABLICA 28. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR325-T500 (NASTAVAK).....	55
TABLICA 29. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR400-T050. ....	56
TABLICA 30. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR400-T050 (NASTAVAK).....	57
TABLICA 31. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR400-T350. ....	58
TABLICA 32. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR400-T350 (NASTAVAK).....	59
TABLICA 33. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR400-T650. ....	60
TABLICA 34. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE FP-AR400-T650 (NASTAVAK).....	61
TABLICA 35. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR100-T050-R2125. ....	63
TABLICA 36. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR100-T050-R2125 (NASTAVAK). ....	64
TABLICA 37. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR100-T050-R2875. ....	65
TABLICA 38. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR100-T050- R2875 (NASTAVAK). ....	66
TABLICA 39. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR100-T350-R1750. ....	67

---

TABLICA 40. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR100-T350-R1750 (NASTAVAK). .....	68
TABLICA 41. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR100-T350-R3250. ....	69
TABLICA 42. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR100-T350-R3250(NASTAVAK). ....	70
TABLICA 43. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR100-T650-R2125. ....	71
TABLICA 44. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR100-T650-R2125 (NASTAVAK). ....	72
TABLICA 45. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR100-T650-R3250. ....	73
TABLICA 46. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR100-T650-R3250 (NASTAVAK). ....	74
TABLICA 47. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR175-T200-R1750. ....	75
TABLICA 48. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR175-T200-R1750 (NASTAVAK). ....	76
TABLICA 49. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR175-T500-R2875. ....	77
TABLICA 50. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR175-T200-R1750 (NASTAVAK). ....	78
TABLICA 51. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR250-T200-R2125. ....	79
TABLICA 52. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR250-T200-R2125 (NASTAVAK). ....	80
TABLICA 53. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR250-T350-R3250. ....	81
TABLICA 54. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR250-T350-R3250 (NASTAVAK). ....	82
TABLICA 55. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR250-T500-R1750. ....	83
TABLICA 56. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR250-T500-R1750 (NASTAVAK). ....	84
TABLICA 57. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR250-T650-R2500. ....	85
TABLICA 58. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR250-T650-R2500 (NASTAVAK). ....	86
TABLICA 59. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR325-T050-R1750. ....	87
TABLICA 60. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR325-T050-R1750 (NASTAVAK). ....	88

---

TABLICA 61. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR325-T200-R2875. ....	89
TABLICA 62. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR325-T200-R2875 (NASTAVAK). ....	90
TABLICA 63. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR325-T500-R2875. ....	91
TABLICA 64. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR325-T500-R2875 (NASTAVAK). ....	92
TABLICA 65. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR400-T050-R3250. ....	93
TABLICA 66. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR400-T050-R3250 (NASTAVAK). ....	94
TABLICA 67. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR400-T350-R1750. ....	95
TABLICA 68. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR400-T350-R1750 (NASTAVAK). ....	96
TABLICA 69. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR400-T350-R2500. ....	97
TABLICA 70. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR400-T350-R2500 (NASTAVAK). ....	98
TABLICA 71. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR400-T650-R1750. ....	99
TABLICA 72. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR400-T650-R1750 (NASTAVAK). ....	100
TABLICA 73. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR400-T650-R3250. ....	101
TABLICA 74. KARAKTERISTIKE I REZULTATI ZA PANEL OZNAKE CP-AR400-T650-R3250 (NASTAVAK). ....	102

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$a$	[mm]	Duljina uzdužne stranice panela
$A$	[mm <sup>2</sup> ]	Površina poprečnog presjeka panela
$a^e$	[mm]	Duljina konačnih elemenata duž stranice a panela
$b$	[mm]	Duljina poprečne stranice panela
$b^e$	[mm]	Duljina konačnih elemenata duž stranice b panela
$C_1$	-	Konstanta
$C_2$	-	Konstanta
$E$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Youngov modul elastičnosti
$E_s$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Sekantni modul elastičnosti
$E_t$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Tangentni modul elastičnosti
$F_{CR}$	[N]	Korigiran kritična sila
$F_E$	[N]	Uzdužna reakcija pri elastičnom izvijanju
$F_{E1}$	[N]	Uzdužna reakcija dobivena bifurkacijskom analizom (1.način izvijanja)
$F_{E2}$	[N]	Uzdužna reakcija dobivena bifurkacijskom analizom (2.način izvijanja)
$F_{E3}$	[N]	Uzdužna reakcija dobivena bifurkacijskom analizom (3.način izvijanja)
$F_{E4}$	[N]	Uzdužna reakcija dobivena bifurkacijskom analizom (4.način izvijanja)
$F_{U1}$	[N]	Uzdužna reakcija prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji
$F_{U2}$	[N]	Uzdužna reakcija određena prema bilinearnom materijalnom modelu
$F_{U3}$	[N]	Uzdužna reakcija određena prema Ramberg-Osgood materijalnom modelu
$k$	-	Koeficijent izvijanja
$m$	-	Broj uzdužnih poluvalova izvijanja
$N_a^e$	-	Broj konačnih elemenata duž stranice a panela
$N_b^e$	-	Broj konačnih elemenata duž stranice b panela
$N^e$	-	Ukupni broj konačnih elemenata

$n_{RO}$	-	Ramberg-Osgoodov faktor
$r$	[mm]	Radius zakrivljenosti panela
$t$	[mm]	Debljina panela
$u_{CR}$	[mm]	Korigirani kritični pomak
$u_E$	[mm]	Kritični pomak pri elastičnom izvijanju
$u_{E1}$	[mm]	Kritični pomak dobiven bifurkacijskom analizom (1.način izvijanja)
$u_{E2}$	[mm]	Kritični pomak dobiven bifurkacijskom analizom (2.način izvijanja)
$u_{E3}$	[mm]	Kritični pomak dobiven bifurkacijskom analizom (3.način izvijanja)
$u_{E4}$	[mm]	Kritični pomak dobiven bifurkacijskom analizom (4.način izvijanja)
$u_{U1}$	[mm]	Granični pomak prema postojećoj poluempirijskoj formuli
$u_{U2}$	[mm]	Granični pomak određen prema bilinearnom materijalnom modelu
$u_{U3}$	[mm]	Granični pomak određen prema Ramberg-Osgood materijalnom modelu
$\alpha$	-	Aspektni odnos duljina stranica panela
$\alpha^e$	-	Aspektni odnos duljina stranica konačnih elemenata
$\varepsilon_{CR}$	-	Korigirana kritična deformacija
$\varepsilon_E$	-	Kritična deformacija pri elastičnom izvijanju
$\varepsilon_{E1}$	-	Kritična deformacija dobivena bifurkacijskom analizom (1.način izvijanja)
$\varepsilon_{E2}$	-	Kritična deformacija dobivena bifurkacijskom analizom (2.način izvijanja)
$\varepsilon_{E3}$	-	Kritična deformacija dobivena bifurkacijskom analizom (3.način izvijanja)
$\varepsilon_{E4}$	-	Kritična deformacija dobivena bifurkacijskom analizom (4.način izvijanja)
$\varepsilon_{U1}$	-	Granična deformacija prema postojećoj poluempirijskoj formuli
$\varepsilon_{U2}$	-	Granična deformacija određena prema bilinearnom materijalnom modelu
$\varepsilon_{U3}$	-	Granična deformacija određena prema Ramberg-Osgood

		materijalnom modelu
$\eta$	-	Faktor redukcije za plastičnost
$\nu$	-	Elasto-plastični Poissonov koeficijent
$\nu_e$	-	Poissonov koeficijent
$\sigma_{0.2Y}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Granica tečenja
$\sigma_{CR}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Korigirano kritično naprezanje
$\sigma_E$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Kritično naprezanje pri elastičnom izvijanju
$\sigma_{E1}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Kritično naprezanje dobiveno bifurkacijskom analizom (1.način izvijanja)
$\sigma_{E2}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Kritična deformacija dobivena bifurkacijskom analizom (2.način izvijanja)
$\sigma_{E3}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Kritična deformacija dobivena bifurkacijskom analizom (3.način izvijanja)
$\sigma_{E4}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Kritična deformacija dobivena bifurkacijskom analizom (4.način izvijanja)
$\sigma_{U1}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Granično naprezanje prema postojećoj poluempirijskoj formuli
$\sigma_{U2}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Granično naprezanje određeno prema bilinearnom materijalnom modelu
$\sigma_{U3}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Granično naprezanje određeno prema Ramberg-Osgood materijalnom modelu

## SAŽETAK

Cilj ovoga rada je iznalaženje projektnog izraza pomoću kojeg bi se mogla odrediti granična nosivost jednoosno tlačno opterećenih elemenata oplata zrakoplova. Kako bi uopće bilo moguće procijeniti valjanost formuliranih izraza, kroz poglavlja ovog rada pojašnjene su postojeće spoznaje na temu razmatranog problema.

Prilikom projektiranja, na izbor relevantnih kriterija nosivosti pri određivanju geometrijskih i materijalnih značajki, bitan utjecaj ima način na koji je nosivi dio konstrukcije zrakoplova opterećen pri eksploataciji. Naglašeno je da je znatan dio ukrepljenih panela nosivih dijelova konstrukcije zrakoplova pri eksploataciji opterećen tlačno te je kao posljedica toga, izvijanje relevantan kriterij prilikom određivanja granične nosivosti. Bitna stavka je i materijal od kojeg je nosivi element izrađen, u okviru ovog rada aluminijske legure oznake 2024-T62. Zrakoplovni ukrepljeni paneli načinjeni od aluminijskih legura projektiraju se s obzirom na poslije-kritično i granično ponašanje budući da se kolaps u pojedinim slučajevima može podudarati s izvijanjem ili pak nastupiti znatno nakon izvijanja. Općenito, kolaps je posljedica kombinacije velikih progiba iniciranih izvijanjem i plastičnosti. Zato je potrebno koristiti metode kojima je moguće obuhvatiti i što točnije predvidjeti kritičnu, poslije-kritičnu te graničnu nosivost, prilikom čega bi u obzir trebalo uzeti i korekciju za utjecaj plastičnosti materijala. Sukladno tomu, u okviru ovog rada prvo je definiran parcijalni plan pokusa koristeći računalni alat Design Expert, a uzimajući u obzir relevantne geometrijske varijable razmatranih elemenata oplata (debljina, odnos stranica i radijus zakrivljenosti), nakon čega su provedene numeričke simulacije koristeći računalni alat FEMAP/NX Nastran. Vrijednosti granične nosivosti dobivene nelinearnom analizom metodom konačnih elemenata sa Ramberg – Osgoodovim materijalnim modelom bile su referentne prilikom provedbe regresijske analize s ciljem formulacije traženog projektnog izraza.

Na kraju usporedbom rezultata svih provedenih analiza ocijenjeni su dobiveni projektni izrazi. Samo pomoću jedne od ukupno sedam predloženih jednadžbi dobiveni su rezultati koji odgovaraju referentnima. Prema tom izrazu, mogla bi se određivati granična čvrstoća jednoosno tlačno opterećene i zglobno oslonjene, jednostruko zakrivljene, izotropne

oplate zrakoplova za korišteni materijal. U praksi, analize sličnih problema zbog raznih nelinearnosti (geometrijske, materijalne) mogu biti računalno i vremenski vrlo zahtjevne, a proračuni matematički kompleksni. Stoga se nameće potreba za iznalaženjem jednostavnijih rješenja uz zadržavanje visoke razine točnosti. Dodatnu prednost predstavljala bi i ovisnost o što manje atributa (materijalnih, geometrijskih karakteristika elementa konstrukcije i sl.). U tom smislu formulirani projektni izraz mogao bi donijeti uštedu kako računskih resursa tako i vremena.

Ključne riječi: granična nosivost; izvijanje; nelinearna analiza metodom konačnih elemenata; surogat modeliranje; odzivna ploha.



## SUMMARY

The goal of this final thesis is to establish a design formula for calculation of the ultimate strength of uni-axially compressed sheets of the aircraft skin. In order to estimate the validity of the obtained formulations, familiar knowledge on that subject are clarified throughout the chapters of this thesis.

During the design, type of the load applied to a structural element has a great impact on the choice of its geometrical and material characteristics. It has been highlighted that a considerable part of the stiffened panels of the load carrying aircraft structures is compressively loaded during exploitation, meaning that buckling is the relevant criteria for determining ultimate strength of such structural elements. Another important factor is the material of which the structural element is made of. In this thesis only aluminum alloy 2024-T62 is considered. Aluminum aerospace stiffened panels are designed based on post-buckling and ultimate strength behavior, since in some cases failure and buckling can be coincident, and in other cases failure occurs at loads considerably in excess of the buckling load. Generally, failure is a combination of large deflection effects initiated at buckling and plasticity effects. Therefore, it is necessary to use methods which enable inclusion and prediction of buckling, post-buckling and ultimate strength, plasticity of the material should also be accounted for. Considering this, a fraction factorial plan of experiments was established using Design Expert program package, considering all relevant geometrical variables of analyzed skin elements (thickness, aspect ratio of panel sides and curvature radius), after which, numerical simulations were performed using FEMAP/NX Nastran program package. During regression analysis in order to formulate wanted expression, ultimate strength values derived from nonlinear finite element method analysis using Ramberg – Osgood material model were used.

At the end, all derived formulations were assessed in comparison with numerical simulations. Only one among seven formulated expressions gave results which are in excellent agreement with the referent ones. Using that formula, ultimate strength of uni-axially compressed, simply supported, single-curved isotropic sheets of aircraft skin could be calculated, for material used. Analysis of similar problems can often be very complex due to

different nonlinearities involved (geometrical, material), as well as mathematically complex. Hence, there is a need for more simple solutions while keeping the same level of accuracy. Additional advantage would also be dependence on as little as possible attributes (material and geometrical characteristics of structural elements). In that sense, obtained formulations would provide savings in computational resources and in time.

Key words: ultimate strength; buckling; nonlinear finite element method analysis; surrogate modeling; response surface.

## 1. UVOD

Većina različitih zrakoplovnih konstrukcija spada u kategoriju poluljuskastih (eng. *semi-monocoque*) tankostjenih konstrukcija sastavljenih uglavnom od ravnih i/ili zakrivljenih ukrepljenih panela, koji pri tome predstavljaju osnovne građevne elemente nosive konstrukcije. Značajan dio ukrepljenih panela nosivih dijelova konstrukcije zrakoplova je pri eksploataciji opterećen tlačno, što se odražava na njihovo projektiranje, tj. na izbor relevantnih kriterija nosivosti pri određivanju njihovih geometrijskih i materijalnih značajki.

Cilj ovoga rada je demonstrirati mogućnost primjene postojećih metoda za analizu odziva nosivih konstrukcija te planiranje pokusa i surogat modeliranje u svrhu određivanja pojednostavljenih, približnih projektnih izraza za opis razine nosivosti osnovnih elemenata ukrepljenih panela u njihovom graničnom stanju nosivosti te prikazati razinu točnosti koja se pri tome može postići. Sve korištene metode implementirane su unutar računalnih alata dostupnih na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, pri čemu se za izradu diskretiziranih modela te geometrijski i materijalno nelinearnu analizu metodom konačnih elemenata koristi računalni alat FEMAP/NXNastran [1], dok se za planiranje (računalnih) pokusa i surogat modeliranje koristi računalni alat Design Expert [2].

U tome smislu, u okviru ovoga rada formuliran je projektni izraz pomoću kojega se može odrediti granična nosivost jednoosno tlačno opterećenih elemenata oplata zrakoplova. Rezultirajući izraz ovisan je samo o geometrijskim karakteristikama razmatranih elemenata, pri čemu su razmatranjima obuhvaćeni ravni i jednostruko zakrivljeni, zglobo oslonjeni, elementi oplata (između ukrepa) načinjeni od izotropnog materijala aluminijske legure oznake 2024-T62. Isto tako, razmatranja u okviru ovoga rada ograničena su isključivo na tanke elemente nosive oplata konstrukcije zrakoplova. Tankom oplatom obično se naziva oplata sastavljena od tanjih limova (eng. *sheet*) debljine između 0,15 i 6,3 mm, dok je deblja oplata sastavljena od debljih limova (eng. *plate*) debljine veće od 6,3 mm. Oplata tanja od 0,15 mm naziva se folija (eng. *film*) [3],[4].

## 1.1. Osnovno o razmatranim elementima nosive konstrukcije zrakoplova

Dijelovi nosive konstrukcije zrakoplova čije oštećenje ugrožava sigurnost zrakoplova smatraju se primarnim nosivim dijelovima konstrukcije. Među glavnosivne dijelove konstrukcijezrakoplova spadaju: trup, krilo, rep, kao i različiti kritični spojevi (npr. spoj krila s trupom, spoj stajnog organa s krilom i/ili trupom i sl) [4].

Za izradu oplata i ukrepa trupa koriste se tanki i deblji limovi (debljine obično do 10 mm), dok se deblji limovi (25-50 mm) koriste za izradu oplata krila, a najdeblji (debljine do 150 mm) za izradu tlakonepropusnih pregrada te ramenača krila [4]. Budući da su razmatranja u okviru ovog rada ograničena isključivo na tanke limove, može se zaključiti da se pri tome radi o panelima oplata trupa zrakoplova.

Trup modernih zrakoplova je najčešće poluljuskasta konstrukcija sastavljena od oplata te uzdužnih i poprečnih ukrepa/nosača. Tijekom leta zrakoplova trup je uslijed opterećenja koja se prenose s krila predominantno opterećen na savijanje te djelovanjem unutrašnjeg pritiska (ovisno o nadmorskoj visini leta). Pri tome je gornji dio trupa (iznad uzdužne neutralne osi) opterećen vlačno, bočni dio trupa pretežno smično, dok je donji dio (ispod uzdužne neutralne osi) opterećen tlačno.

## 1.2. Osnovno o razmatranom materijalu zrakoplovnih konstrukcija

Osnovni zahtjevi koji se postavljaju na materijale u zrakoplovstvu su: mala masa, visoka specifična čvrstoća, zadovoljavajuća krutost, otpornost na umor, otpornost na naglom širenju pukotina, otpornost na koroziju, mehanička otpornost pri visokim temperaturama (otpornost na puzanje), otpornost na gorenje te apsorpcija vibracija i buke [5]. Čisti metali u elementarnom stanju teško bi zadovoljili navedene uvjete te se stoga ciljano razvijaju razne legure i drugi materijali. Među najzastupljenijim materijalima u zrakoplovstvu danas su aluminijske legure.

Svojstva aluminijskih legura mogu varirati kao rezultat kemijskog sastava te stanja mikrostrukture. Pozitivno svojstvo aluminijskih legura je relativno visoka specifična čvrstoća, s obzirom na koje lako konkuriraju čvršćim, ali i težim titanovim legurama te čelicima (čvrstoća im je tri puta niža nego čeliku). Nadalje, aluminijske legure otporne su na

niske temperature budući da snižavanjem temperature postaju čvršće dok istovremeno ne gube značajnije na žilavosti. U usporedbi s drugim metalima, aluminijske legure se lako oblikuju i strojno obrađuju, bilo u toplom ili hladnom stanju. Također, odlikuju ih i visoka toplinska i električna vodljivost te visoka reflektivnost i recikličnost. Čisti aluminij kao i njegove legure su otporni na koroziju zahvaljujući tankom sloju aluminijskog oksida koji se stvara na zraku i u vodenim otopinama, a pruža zaštitu u raznim okolišnim uvjetima i agresivnim medijima, izuzev lužina koje ga otapaju. Jedan od nedostataka visokočvrstih aluminijskih legura je relativno nizak modul elastičnosti. Zbog toga su ove legure znatno elastičnije u usporedbi s istovjetnim čeličnim legurama. Ograničena je njihova primjenjivost pri povišenim temperaturama zbog niskog tališta (talište aluminija je na 660 °C). Aluminijske legure potrebno je zavarivati u inertnoj atmosferi zbog njihove sklonosti oksidaciji. Iako su čisti aluminij i mnoge njegove legure otporni na koroziju, kod visokočvrstih aluminijskih legura korozija ipak može predstavljati problem te se zbog toga one obično prevlače tankim slojem čistog aluminija čime se postiže tražena otpornost na koroziju.

Legure aluminija klasificirane su prema tri kriterija; tehnološkoj preradi, kemijskom sastavu i toplinskoj obradi. Prema tehnološkoj preradi razlikuju se legure za gnječenje i legure za lijevanje. Kad je riječ o kemijskom sastavu samo je nekolicina elemenata koji imaju dovoljnu topljivost u aluminiju te oni s aluminijem čine dvokomponentne legure. Ti elementi su bakar, magnezij, silicij, cink, mangan te u novije vrijeme litij. Moguće je njihovim kombiniranjem stvoriti i kompleksnije legure. Prema sklonosti toplinskoj obradi aluminijske legure moguće je podijeliti na toplinski neočvrstljive i toplinski očvrstljive legure. Aluminijske legure označavaju se normiranim četveroznamenkastim oznakama. Prva znamenka uvijek označava glavni legirni element. Kod aluminijskih legura za gnječenje druga znamenka označava modifikacije u odnosu na izvornu leguru, a treća i četvrta označavaju specifičnu leguru unutar serije. Kod aluminijskih legura za lijevanje druga i treća znamenka označavaju specifičnu leguru nakon čega slijede točka i nula koja označava lijevanje. Oznake stanja koriste se za sve aluminijske legure, dolaze iza brojačane oznake odvojene crticom, a temelje se na mehaničkim i toplinskim obradama. Označavaju se velikim slovima F (primarno stanje), O (žareno), H (hladno deformirano), W (rastopno žareno) i T (toplinski obrađeno) [5].

U okviru ovog rada razmatra se isključivo legura oznake 2024-T62. To je legura u kojoj je osnovni legirni element bakar, a legura je rastopno žarena i umjetno dozrijevana. Općenito se za legure skupine 2xxx može reći da su toplinski očvrstljive, da imaju visoku

čvrstoću pri povišenim temperaturama, vlačna čvrstoća im je u rasponu od 190 do 430 MPa, neke legure su zavarljive, ali se uglavnom koriste mehanički postupci spajanja, imaju manju otpornost na koroziju u odnosu na druge skupine legura zbog čega se prevlače tankim slojem vrlo čistog aluminija. Ove legure su prikladne za izradu zrakoplovnih konstrukcija kao što su dijelovi trupa i oplata krila gdje su visoki zahtjevi na specifičnu čvrstoću. Konkretno, legura 2024 primjenjuje se za izradu elemenata trupa zrakoplova, visokoopterećenih elemenata krila, rebara i općenito dijelova za koje se zahtjeva visoka čvrstoća i dinamička izdržljivost[6].

## 2. POSTOJEĆE SPOZNAJE VEZANE UZ RAZMATRANI PROBLEM

### 2.1. Općenita razmatranja

Tlačno opterećene ukrepljene panele zrakoplovnih konstrukcija karakterizira mogućnost pojave (obično elastičnog) izvijanja, koje se radi visoke vitkosti oplata obično inicira u elementima koji predstavljaju predmet razmatranja unutar ovoga rada, tj. u elementima oplata između ukrepa. Iako se nakon pojave izvijanja krutost panela značajno smanjuje, granična nosivost panela obično pri tome još nije dosegnuta, jer pri tome obično postoji određena rezerva poslije-kritične nosivosti koja se u potpunosti iscrpljuje tek završetkom složenog neelastičnog procesa kolapsa panela. Do kolapsnog stanja, tj. graničnog stanja nosivosti (eng. *ultimate limit state*) panela može doći uslijed različitih kombinacija pojava lokalnog izvijanja oplata i ukrepa panela, ili pojavom globalnog izvijanja panela. Pri tome se granično stanje nosivosti panela može prepoznati kao maksimum pripadajuće fenomenološke krivulje (eng. *load – end shortening curve*; *average stress – average strain curve*) kojom se opisuje odnos između narinutog opterećenja (ili naprezanja) i rezultirajućeg pomaka (ili deformacije), pri čemu je prisutnost pojave popuštanja pojedinih dijelova panela i različitih pojava lokalnog izvijanja u panelu već značajno izražena.

Stoga je pri projektiranju tlačno opterećenih ukrepljenih panela zasnovanom na evaluaciji graničnog stanja nosivosti (eng. *ultimate limit state - ULS design approach*; *load-resistance factor design - LRFD approach*) potrebno koristiti metode kojima je moguće obuhvatiti i što točnije predvidjeti njihovu kritičnu, poslije-kritičnu te graničnu nosivost, pri čemu bi trebalo biti moguće u obzir uzeti i korekciju za utjecaj plastičnosti materijala. Zrakoplovni ukrepljeni paneli načinjeni od aluminijskih legura projektiraju se s obzirom na poslije-kritično i granično ponašanje [7], pri čemu se dozvoljava lokalno izvijanje oplata za opterećenja manja od graničnog (eng. *ultimate load*). S obzirom da se pri graničnom opterećenju dozvoljava i pojava plastičnih deformacija, analiza poslije-kritičnog ponašanja osim što je geometrijski nelinearna, postaje i materijalno nelinearna (elasto-plastična).

U nekim slučajevima, izvijanje elementa ujedno znači i nemogućnost daljnjeg preuzimanja opterećenja, tj. koincidentnost pojave izvijanja i kolapsa. U drugim slučajevima,

prije svega kod ravnih i blago zakrivljenih panela koji se izvijaju elastično, kolaps nastupa pri opterećenjima značajno većim od kritičnog opterećenja pri kojem dolazi do izvijanja.

Općenito, kolaps je posljedica kombinacije velikih progiba iniciranih izvijanjem i plastičnosti. Zbog nelinearnosti vezanih i uz velike progibe i uz plastičnost, određivanje teorijskog graničnog opterećenja bilo kojeg izvijenog elementa je matematički kompleksno. S druge strane, budući da izvijanje inicira procese koji s vremenom dovode do kolapsa, od iznimne je važnosti što točnije odrediti kritično opterećenje/naprezanje.

Kolaps se u pojedinim slučajevima može podudarati s izvijanjem ili pak nastupiti znatno nakon izvijanja. Zbog toga je važno ispitati poslije-kritično ponašanje raznih elemenata kako bi se moglo odrediti uvijete pod kojima granično opterećenje može premašiti kritično opterećenje [8].

## 2.2. Elastična analiza izvijanja

Teorijsko kritično naprezanje ravnih strukturnih elemenata može se okarakterizirati kao naprezanje pri kojem dolazi do gubitka stabilne ravnoteže pri kojem razmatrani (inicijalno ravni) element poprima zakrivljeni oblik. Pri tome, daljnje povećanje opterećenja dovodi do ubrzanog rasta progiba okomitog na vlastitu ravninu panela, te se iniciraju procesi koji postupno dovode do kolapsa panela.

Matematičko rješenje pojedinih problema izvijanja zahtjeva da budu zadovoljeni uvjeti ravnoteže i rubni uvjeti. To se može postići integriranjem parcijalnih diferencijalnih jednačbi ravnoteže ravnih panela ili primjenom matematičkih metoda koje ne moraju u potpunosti zadovoljiti rubne uvjete ili uvjete ravnoteže. Riješenja matematičkih metoda su egzaktna, dok metode temeljene na energijskim integralima daju približna, ali obično vrlo točna rješenja. Potreba za približnim rješenjima proizlazi iz činjenice da se potpuno točna rješenja mogu pronaći samo za ograničen broj problema izvijanja koji su od praktične važnosti.

Kako će se pojedini panel izviti, osim o tipu narinutog opterećenja, ovisi i o rubnim uvjetima. U elastičnoj analizi izvijanja, kritično naprezanje ravnih panela može se odrediti prema jednačbi(1), [9]:



$$\sigma_{CR} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu)^2} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (1)$$

gdje je  $k$  koeficijent izvijanja koji se za razmatrani slučaj opterećenja i rubnih uvjeta može odrediti prema jednadžbi (2), [9]:

$$k = \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb}\right)^2 \quad (2)$$

gdje je  $m$  broj poluvalova izvijanja, koji se može jednoznačno odrediti iz jednadžbe (5), kao najmanji (pozitivni) cijeli broj koji zadovoljava nejednadžbu (3).

$$\frac{a}{b} \leq \sqrt{m(m+1)} \quad (3)$$

$$\alpha^2 \leq m^2 + m$$

$$m^2 + m - \alpha^2 \geq 0$$

$$m_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 4\alpha^2}}{2} \geq 0$$

$$m = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha^2}}{2} = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 + 4\alpha^2} \quad (4)$$

Za razmatrano kritično naprezanje odgovarajuća kritična deformacija može se odrediti pomoću jednadžbe (5), tj. koristeći Ramberg-Osgoodovu [10] formulaciju međuodnosa prosječne inženjerske deformacije i prosječnog inženjerskog naprezanja:

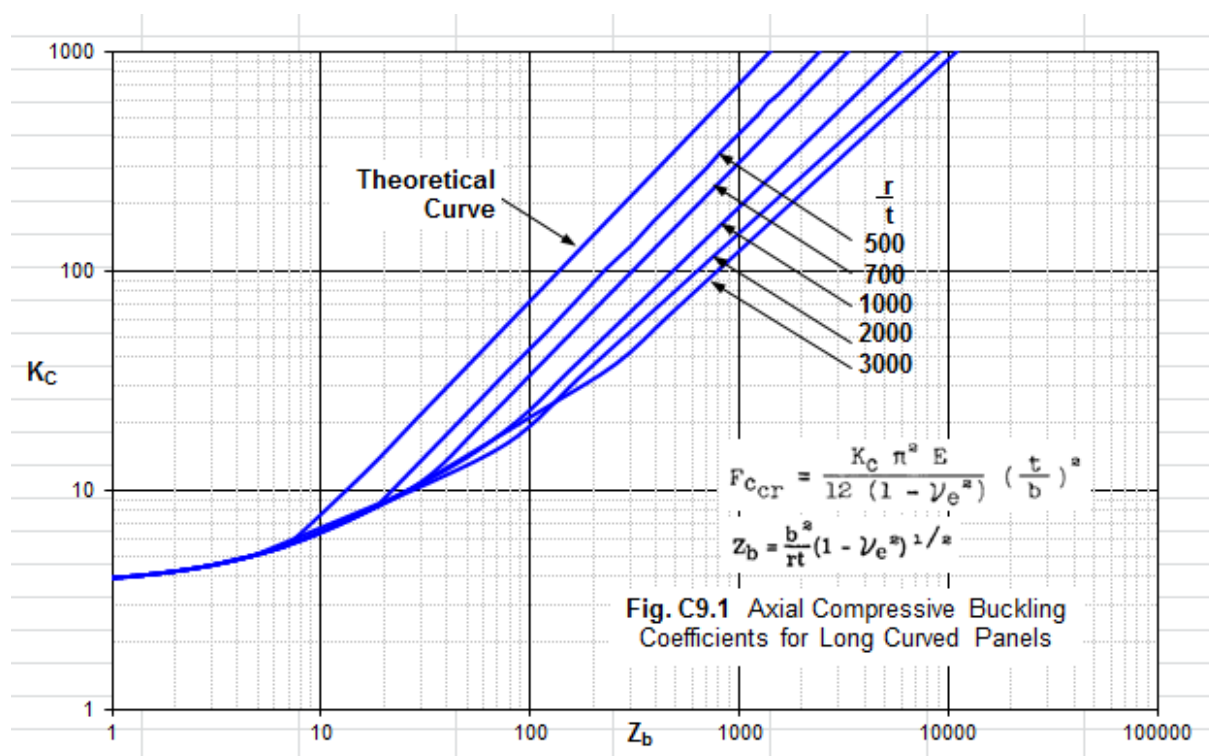
$$\varepsilon_{CR} = \frac{\sigma_{CR}}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma_{CR}}{\sigma_{0.2y}}\right)^n \quad (5)$$

gdje je  $\sigma_{0.2y}$  granica tečenja strukturnog materijala, a  $n$  parametar oblika koji opisuje zakrivljenost „koljena“  $\sigma$ - $\varepsilon$  krivulje za razmatrani materijal. Za aluminijevu leguru korištenu u okviru ovoga rada vrijedi  $n=34$  [9].

Prirodno je očekivati da ponašanje tlačno opterećenih zakrivljenih panela bude u mnogočemu slično ponašanju tlačno opterećenih cilindara budući da se zakrivljeni panel u biti može smatrati dijelom cilindra. Dugi paneli dostatne zakrivljenosti upravo i pokazuju iste karakteristike deformiranja kao i dugi cilindri, tj. i jedni i drugi se izvijaju pri opterećenjima značajno manjim od onih koje predviđa linearna teorija. U slučaju kad je zakrivljenost panela

velika, jednoosno tlačno opterećeni zakrivljeni paneli izvijaju se jednako kao i cilindri, dok se u slučaju male zakrivljenosti panela izvijaju isto kao i ravni paneli. Između ta dva granična slučaja postoji prijelazno područje[11].

Koeficijent izvijanja za zakrivljene panele  $K_C$  razlikuje se od koeficijenta izvijanja ravnih panela  $k$ . Može se odrediti pomoću postojećih projektnih krivulja, kako je prikazano na Sliku 1. Izvijanje tlačno opterećenih zakrivljenih panela ovisno je o parametru zakrivljenosti  $Z_b$  (vidi Sliku 1). Pri vrijednostima  $Z_b$  manjim od deset, kritično naprezanje zakrivljenih panela približno je isto kao i za ravne panele (uz pretpostavku istih rubnih uvjeta). Vrijednost parametra  $Z_b$  između deset i tisuću definira prijelazno područje ponašanja zakrivljenih panela prilikom izvijanja, između onog koje bi odgovaralo izvijanju ravnih panela i onog koje bi odgovaralo izvijanju cilindra. U tom području rubni uvjeti duž opterećenih i neopterećenih, rubova imaju značajan utjecaj na kritično naprezanje. Iznad vrijednosti  $Z_b$  većih od tisuću, dominantno ponašanje je onopoput cilindra, pri čemu su rubni uvjeti nevažni [8].



Slika 1. Koeficijent izvijanja tlačno opterećenih zakrivljenih panela[12].

Ukupna kritična uzdužna sila i kritični uzdužni pomak mogu se odrediti na osnovu izraza (6) i (7), kako slijedi:

$$F_E = \sigma_{CR} A \quad (6)$$

$$u_E = \epsilon_{CR} a \quad (7)$$

gdje je  $A=bt$  površina poprečnog presjeka panela, a  $a$  duljina uzdužne stranice panela.

### 2.3. Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti

Kad je izračunato kritično naprezanje veće od granice proporcionalnosti materijala, to se odražava na članove  $k$ ,  $E$  i  $\nu$ , u jednadžbi (1). Koeficijent izvijanja  $k$  ovisi o tipu opterećenja i valnoj duljini izvijanja, ovisnoj o geometrijskim karakteristikama rubnih uvijeta i odnosu stranica panela. Modul elastičnosti  $E$  izmjenjen je pod utjecajem smanjenjene savojne krutosti povezanom s neelastičnim ponašanjem. Poissonov koeficijent  $\nu$  u području tečenja postupno prelazi od elastične vrijednosti  $\nu_e$  do iznosa 0.5 karakterističnog za nestlačive izotropne materijale [9].

Radi jednostavnijeg računanja svi utjecaji plastičnosti mogu se objediniti unutar jednog koeficijenta, tj. faktora redukcije za plastičnost  $\eta$ , koji predstavlja odnos između kritičnog naprezanja pri elastičnom izvijanju i kritičnog naprezanja pri plastičnom izvijanju. Imajući to na umu, jednadžbu (1) može se zapisati u obliku jednadžbe (10), čime se dobiva izraz za kritično naprezanje korigirano za utjecaj plastičnosti:

$$\sigma_{CR} = \eta \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu)^2} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (8)$$

Budući da je u elastičnom području  $\eta = 1$ , jednadžba (8) se može koristiti i u elastičnoj analizi. Vrijednosti  $k$  i  $\nu$  uvijek su jednake elastičnim vrijednostima, budući da koeficijent  $\eta$  sadrži sve utjecaje plastičnosti; a računa se iz jednadžbe (9) za zglobno oslonjene jednoosno tlačno opterećene panele [9], razmatrane u okviru ovog rada.

$$\eta = \frac{E_s}{2E} \left( \frac{1-\nu_e^2}{1-\nu^2} \right) \left( 1 + 0.5 \sqrt{1 + 3 \frac{E_t}{E_s}} \right) \quad (9)$$

Za vrijednosti naprezanja veće od granice proporcionalnosti, odnos naprezanja i deformacije opisuje jednadžba (10):

$$\sigma = E_s \varepsilon \quad (10)$$

Ista jednažba zapisana u inkrementalnom obliku dana je izrazom (11).

$$d\sigma = E_t d\varepsilon \quad (11)$$

U jednažbama (10) i (11)  $E_s$  i  $E_t$  su sekantni i tangenti moduli elastičnosti, oba se mijenjaju s naprežanjem, a vrijede isključivo za proces povećanja narinutog opterećenja. Proces rasterećenja se obično odvija po liniji koja je paralelna pravcu koji opisuje odnos naprežanja i deformacije u linearno-elastičnom području [9].

Izraz za određivanje tangentnog modula elastičnosti može se izvesti iz izraza (12), koji predstavlja jedan od oblika Ramberg-Osgoodove formulacije veze između inženjerskog naprežanja i inženjerske deformacije, tj. poopćeni oblik prethodno korištene jednažbe (5):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n \quad (12)$$

Derivacijom po  $\varepsilon$  i sređivanjem izraza dobiva se:

$$1 = \frac{E_t}{E} + 0.002n \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1} \frac{E_t}{\sigma_y}$$

Nakon dijeljenja s  $E_t$  i daljnjim sređivanjem dobiva se:

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_t} &= \frac{1}{E} + \frac{0.002n}{\sigma_y} \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1} \\ \frac{E}{E_t} &= 1 + \frac{0.002nE}{\sigma_y} \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1} = \frac{\sigma_y + 0.002nE \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1}}{\sigma_y} \end{aligned}$$

U konačnici se  $E_t$  može eksplicitno izraziti na sledeći način:

$$E_t = \frac{\sigma_y E}{\sigma_y + 0.002n \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1} E} \quad (13)$$

Poissonov koeficijent za većinu metala i metalnih legurau elastičnom području iznosi  $0,25 \leq \nu \leq 0,33$ , dok je za izotropne nestlačive materijale jednak  $\nu = 0,5$  u plastičnom

području. Prijelaz od elastične vrijednosti  $v_e$  do vrijednosti  $v_p$  izotropnog nestlačivog materijala najviše je izražen u području tečenja. Budući da se Poissonov koeficijent pojavljuje u izrazu za kritično naprezanje, taj prijelaz je važan za probleme neelastičnog izvijanja [9]. Elasto-plastični Poissonov koeficijent se prema [9] definira na sljedeći način:

$$\nu = \nu_p - (\nu_p - \nu_e) \frac{E_s}{E} \quad (14)$$

pri čemu je  $\nu_p = 0.5$  i  $\nu_e = 0.33$ .

Korigirana kritična deformacija može se odrediti iz jednadžbe (15):

$$\varepsilon_{CR} = \frac{k\pi^2}{12(1 - \nu_e^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (15)$$

dok se odgovarajuća uzdužna kritična sila i pomak mogu odrediti iz slijedećih izraza:

$$F_{CR} = \sigma_{CR} A \quad (16)$$

$$u_{CR} = \varepsilon_{CR} a \quad (17)$$

## 2.4. Postojeća poluempirijska formulacija granične nosivosti

Za ravne panele, ograničenja po rubovima neopterećenih krajeva panela dopuštaju razvoj značajnih vlačnih membranskih naprezanja koja ograničavaju intenzitet poprečnih progiba. Kao posljedica toga, ravni paneli mogu podnijeti opterećenja koja značajno nadilaze kritično opterećenje. Kolaps se događa kao posljedica značajnog utjecaja plastičnosti.

Kada se opterećenje narine zakrivljenom panelu, ono doseže kritičnu vrijednost, nakon koje naglo opada. Uslijed daljnje aksijalne deformacije opterećenje nastavlja rasti i doseže graničnu vrijednost, veću od kritičnog opterećenja pri kojem dolazi do izvijanja, ukoliko je izvijanje elastično. Kad je izvijanje plastično, izvijanje i kolaps se podudaraju.

Postojeća poluempirijska formulacija granične nosivosti [8], opisana unutar ovoga poglavlja, odnosi se isključivo na zglobno oslonjene i jednoosno tlačno opterećene ravne

panele, pri čemu način određivanja granične nosivosti ovisi o korigiranom kritičnom naprezanju  $\sigma_{CR}$ .

U slučaju da vrijedi  $\sigma_{CR} \leq C_1^{\frac{1}{C_2}} \sigma_y$ , granična nosivost određuje se na sljedeći način:

$$\sigma_{U1} = \sigma_{CR} \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_{CR}} \right)^{C_2} C_1 \quad (18)$$

gdje su  $C_1$  i  $C_2$  konstante ovisne o tipu materijala i debljini panela. U ovom radu korištene su vrijednosti  $C_1=0.78$  i  $C_2=0.80$ , sukladno Tablici 2 u [8].

U slučaju da vrijedi  $\sigma_{CR} \geq C_1^{\frac{1}{C_2}} \sigma_y$ , granična nosivost jednaka je korigiranom kritičnom naprezanju:

$$\sigma_{U1} = \sigma_{CR} \quad (19)$$

Pripadajuća vrijednost granične deformacije može se odrediti prema:

$$\varepsilon_{U1} = \frac{\sigma_{U1}}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma_{U1}}{\sigma_y} \right)^n \quad (20)$$

dok se granična vrijednost uzdužne sile  $F_{U1}$  i odgovarajući uzdužni pomak  $u_{U1}$  mogu odrediti iz sljedećih izraza:

$$F_{U1} = \sigma_{U1} A \quad (21)$$

$$u_{U1} = \varepsilon_{U1} a \quad (22)$$

### 3. SUROGAT MODELIRANJE RAZMATRANOG MODELA

#### 3.1. Općenita razmatranja

Aproksimacijsko odnosno surogat modeliranje sve se češće koristi za rješavanje složenih, vremenski računalno vrlo zahtjevnih tehničkih problema. Riječ je o modeliranju zasnovanom na korištenju statističkih metoda za izradu aproksimacije odnosno surogata računalnih proračunskih modela. Osnovni koraci surogat modeliranja su planiranje računalnih pokusa, izvođenje računalnih simulacija, generiranje surogat modela i na kraju validacija surogat modela.

Planiranje računalnih pokusa obuhvaća odabir ili oblikovanje modela računalnih pokusa koji će dovoljno dobro opisati promatranu pojavu. Plan pokusa predstavlja pokuse koje je potrebno izvesti, pri čemu se definiraju vrijednosti kontrolnih faktora to jest parametara. Postoji više metoda planiranja pokusa, pri čemu se odabir vrši sukladno razmatranom problemu. Pri tom je bitno koja je namjena surogat modela te koji se surogat model planira generirati [13]. Prema odabranom planu pokusa potrebno je izvesti računalne simulacije, na temelju čijih se rezultata generira surogat model. Prilikom toga se odgovarajućom metodologijom minimizira odstupanje između izvršenih računalnih pokusa i generiranog surogat modela.

U okviru ovog rada korišteni su optimalni plan pokusa i polinomski surogat model, odnosno metoda odzivnih ploha. Optimalni plan pokusa preporučljivo je koristiti kada [13] je broj razina parametara ograničen ili različit za pojedine čimbenike (ako su na primjer za neke čimbenike potrebni samo linearni članovi, a za druge su potrebni i kvadratni i interakcijski članovi polinomskog surogat modela). U okviru ovog rada korišten je algoritam IV-optimal, koji je najbolje koristiti u kombinaciji s metodom odzivnih ploha pri čemu je cilj što točnije i preciznije modelirati odzivnu plohu [2]. Metoda odzivnih ploha je zapravo sažetak matematičkih i statističkih metoda kojima se modeliraju i analiziraju utjecaji nekoliko nezavisnih varijabli na promatrani odziv (u ovom slučaju granična nosivost). To je jedna od najčešće korištenih metoda pri modeliranju determinističkih računalnih simulacija. Najjednostavniji polinomski surogat model neke veličine jest linearni, no surogat model

odzivnim ploham se lako proširuje baznim funkcijama odgovarajućeg reda, prilikom čega treba napomenuti da korištenje polinoma višeg reda vrlo brzo povećava broj nepoznatih koeficijenata koje je potrebno odrediti [13].

### 3.2. Plan pokusa

Za problem razmatran u okviru ovoga rada parametri parcijalnog plana pokusa za ravne panele su: odnos stranica  $a/b$  i debljina ploče  $t$ . Parametri su diskretni, a broj razina parametara je 5. Tablica 1 prikazuje po pet odabranih numeričkih vrijednosti parametara. Iz literature [14] su odabrane standardne vrijednosti debljine i odnosa stranica tankih ravnih panela oplata koje se koriste u praksi. Pomoću računalnog alata Design Expert [2] dobiveni su parovi vrijednosti kontrolnih parametara pokusa koje je potrebno provesti za dovoljno dobro opisivanje problema, a prikazani su u Tablici 2 (12 pokusa od ukupno  $5^2$  mogućih).

**Tablica 1. Vrijednosti parametara za ravne panele**

$t$ [mm]	0,5	2,0	3,5	5,0	6,5
$a/b$ [-]	1	1,75	2,5	3,25	4

**Tablica 2. Plan pokusa-ravni paneli**

Odnos stranica $a/b$ [-]	Debljina $t$ [mm]
3,25	5,00
1,75	2,00
1,75	0,50
2,50	3,50
1,00	0,50
1,00	3,50
4,00	3,50
3,25	2,00
4,00	0,50
2,50	0,50
1,75	6,50
4,00	6,50



Za zakrivljene panele, dodan je i treći parametar parcijalnog plana pokusa, tj. uz debljinu  $t$  i odnos stranica  $a/b$ , razmatra se i radijus zakrivljenosti  $r$  panela. Vrijednosti radijusa zakrivljenosti zakrivljenih panela odabrane su na isti način kao i vrijednosti preostala dva parametra, to su standardne vrijednosti zakrivljenosti panela korištenih u praksi. Parametri su diskretni, a kao i kod ravnih panela postoji pet razina parametara. U Tablici 3 dane su diskretne vrijednosti parametara.

**Tablica 3. Vrijednosti parametara za zakrivljene panele**

t [mm]	0,5	2,0	3,5	5,0	6,5
a/b [-]	1,0	1,75	2,5	3,25	4
R [mm]	1750	2125	2500	2875	3250

U Tablici 4 prikazane su vrijednosti kontrolnih parametara za zakrivljene panele u ukupno 20 pokusa. Kombinacije diskretnih vrijednosti pojedinih parametara u tim pokusima dobivene su pomoću računalnog alata Design Expert [2], prema kojemu je da bi se promatrana pojava dovoljno dobro opisala, uz što manji utrošak računalnih resursa, potrebno provesti 20 od  $5^3$  mogućih pokusa.

**Tablica 4. Plan pokusa-zakrivljeni paneli.**

Debljina t [mm]	Odnos stranica a/b [-]	Radijus zakrivljenosti r [mm]
0,50	4,00	3250,00
0,50	1,00	2125,00
0,50	1,00	2875,00
0,50	3,25	1750,00
2,00	2,50	2125,00
2,00	1,75	1750,00
2,00	3,25	2875,00
3,50	1,00	1750,00
3,50	4,00	1750,00
3,50	1,00	3250,00
3,50	2,50	3250,00
3,50	4,00	2500,00
5,00	2,50	1750,00
5,00	3,25	2875,00

---

5,00	1,75	2875,00
6,50	1,00	2125,00
6,50	2,50	2500,00
6,50	4,00	3250,00
6,50	1,00	3250,00
6,50	4,00	1750,00

## 4. PROVEDBA RAČUNALNIH POKUSA

### 4.1. Općenita razmatranja

U okviru ovoga rada svi računalni pokusi, tj. sve geometrijski i materijalno nelinearne analize metodom konačnih elemenata provedene su korištenjem računalnog alata FEMAP/NX Nastran [1]. Pri provedbi svake od analiza korištena je (nemodificirana) iterativno-inkrementalna Newton-Raphsonova metoda za rješavanje nelinearnih jednadžbi krutosti. Na osnovu dobivenih rezultata za sve inkremente opterećenja generirane su fenomenološke  $\sigma - \varepsilon$  i  $F - u$  krivulje, maksimum kojih predstavlja rezultirajuću vrijednost granične nosivosti, koju je moguće usporediti sa također izračunatim vrijednostima dobivenim primjenom postojeće, u prethodnom poglavlju opisane, polu-empirijske formulacije granične nosivosti (za ravne panele).

Osim prethodno spomenutih analiza, korištenjem istog računalnog alata provedene su za sve diskretizirane modele i analize bifurkacijskog izvijanja, tj. analize vlastitih vrijednosti (eng. *eigenvalue*) vektora opterećenja (za prva četiri moda izvijanja), kako bi se mogle usporediti na taj način dobivene vrijednosti kritičnog opterećenja sa vrijednostima dobivenim na temelju formulacija prikazanih u okviru prethodnog poglavlja.

Svi relevantni aspekti modeliranja svih razmatranih panela opisani su dalje unutar ovoga poglavlja. Detaljan opis geometrijskih, materijalnih i diskretizacijskih značajki razmatranih modela, kao i različiti rezultati svih provedenih analiza prikazani su tablično unutar PRILOGA I (za ravne panele) i PRILOGA II (za zakrivljene panele) ovoga rada.

### 4.2. Materijalni modeli

Jedan od aspekata nelinearnih problema u analizi nosivih konstrukcija jest i materijalna nelinearnost, tj. nelinearna veza između naprezanja i deformacija pri različitim režimima deformiranja materijala razmatrane konstrukcije. Stoga je pri analizi takvih problema potrebno koristiti što točniji opis, tj. što realističniju idealizaciju toga odnosa, kako za elastični, tako i za neelastični režim deformiranja.

Pri provedbi analiza bifurkacijskog izvijanja korišten je linearno elastični materijalni model, koji je za izotropne materijale određen sa dvije od ukupno tri inženjerske materijalne konstante (npr. Youngov modul elastičnosti i Poissonov koeficijent), s obzirom da se treća inženjerska materijalna konstanta (npr. modul smicanja) može jednoznačno odrediti na temelju prethodne dvije.

Za provedene geometrijski i materijalno nelinearne analize materijalna nelinearnost idealizirana je pomoću dva različita elasto plastična materijalna modela, pri čemu je u oba slučaja funkcija popuštanja izražena pomoću HMM uvjeta popuštanja.

Grublji među njima je bilinearni elastični idealnoplastični materijalni model bez očvršćenja deformacijom (eng. *strain hardening*), kod kojega je za izotropne materijale uz prethodno spomenute elastične parametre potrebno definirati još i granicu popuštanja (eng. *yield strength*) materijala. Iako je poznato da se korištenjem ovog materijalnog modela najčešće ne mogu dobiti zadovoljavajuće točni rezultati u analizi konstrukcija načinjenih od aluminijevih legura [15] [10], u okviru ovoga rada provedene su analize pri kojima je korišten i ovaj najjednostavniji elasto plastični materijalni model kako bi se potvrdio njegov loš utjecaj na rezultate analize razmatranog problema.

Nelinearni elasto plastični materijalni model korišten pri provedbi računalnih pokusa zasniva se na Ramberg – Osgoodovom materijalnom modelu [15], koji je izvorno predložen upravo za zrakoplovne aluminijeve legure, a kojim se nelinearni odnos između inženjerskog naprezanja i inženjerske deformacije definira pomoću tri parametra. U izvornoj formulaciji definicijski parametri su: Youngov modul elastičnosti, sekantna granica popuštanja  $\sigma_{0.7}$  (koja odgovara prsjecištu  $\sigma - \varepsilon$  krivulje i sekante  $0,7E$ ) te parametar oblika  $n$ , koji opisuje zakrivljenost „koljena“  $\sigma - \varepsilon$  krivulje. Ovaj danas vrlo rasprostranjeni pristup materijalnom modeliranju zasniva se na eksperimentalno potvrđenom zapažanju da se za mnoge materijale odnos između elastičnih i plastičnih komponenti deformacije može vrlo dobro opisati jednostavnim zakonom potencija. U današnje vrijeme najčešće se koristi jednostavnija formulacija [10] (Mazzolani, 1985):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{y0.2}} \right)^n \quad (23)$$

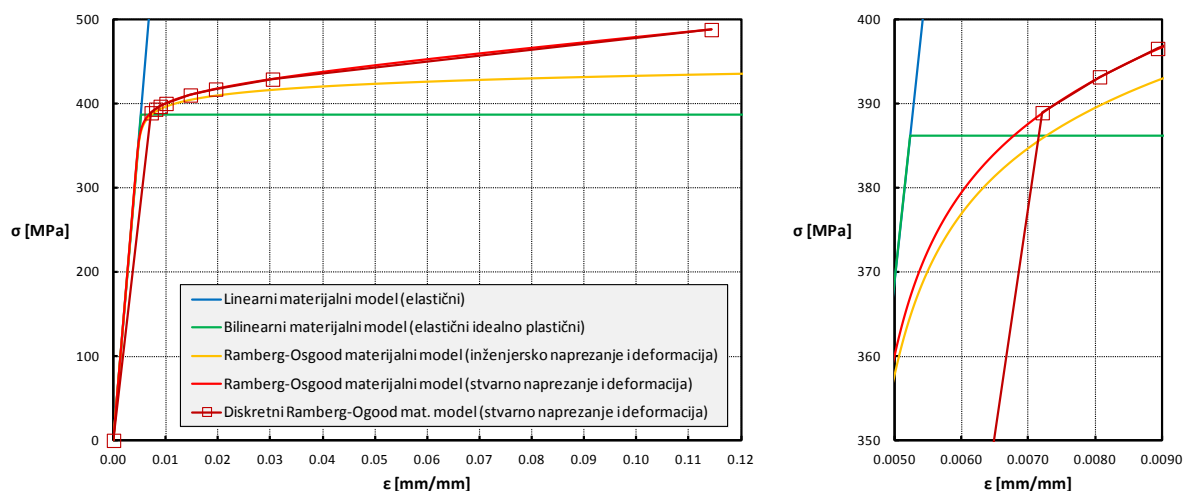
koja je korištena i u okviru ovoga rada, a gdje  $\varepsilon$  predstavlja inženjersku deformaciju,  $\sigma$  inženjersko naprezanje,  $E$  Youngov modul elastičnosti,  $n$  je spomenuti parametar oblika, dok je  $\sigma_{y02}$  inženjersko naprezanje pri 0,2% deformacije, pri čemu se ta vrijednost obično smatra granicom tečenja materijala. Pri tome se može uočiti da ukoliko se ne želi uzeti u obzir očvršćenje deformacijom, tj. ukoliko  $n$  teži u beskonačnost, ovaj materijalni model svodi se na prethodno spomenuti bilinearni elastični idealnoplastični materijalni model.

Pri definiciji materijalnih modela za nelinearnu analizu metodom konačnih elementa odnosi između materijalnih karakteristika trebaju se definirati na razini stvarnog naprezanja  $\sigma_T$  (eng. *true stress*) i stvarne deformacije  $\varepsilon_T$  (eng. *true strain*), koji se mogu aproksimirati pomoću sljedećih izraza [10]:

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (24)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (25)$$

Slika 2 prikazuje različite  $\sigma - \varepsilon$  krivulje za sve materijalne modele korištene u okviru ovoga rada, pri čemu su za sve relevantne definicijske parametre aluminijeve legure oznake 2024-T62 korištene vrijednosti specificirane unutar [6].



Slika 2 Prikaz različitih  $\sigma - \varepsilon$  krivulja za korištene materijalne modele.

### 4.3. Diskretizacija

Svi analizirani modeli diskretizirani su pomoću dvodimenzionalnih izoparametrijskih pravokutnih (CQUAD4) ljuskastih konačnih elemenata sa po šest stupnjeva slobode u svakom čvoru (tri translacije i tri rotacije). S obzirom da se u okviru ovoga rada razmatraju elementarni konstrukcijski elementi pri čijoj diskretizaciji je moguće koristiti vrlo fine i ravnomjerne mreže konačnih elemenata bez značajnijeg porasta utroška računalnih resursa, studija konvergencije rješenja nije provedena. Rezolucija korištenih mreža konačnih elemenata stoga je određena s obzirom na prihvatljiv odnos debljine konačnog elementa i duljine njegove (kraće) stranice (debljina uvijek manja od duljine stranice), pri čemu se težilo i jediničnom omjeru stranica konačnih elemenata. S obzirom da sve razmatrane ravne i zakrivljene panele karakterizira jedan od pet razmatranih odnosa stranica, Tablica 5 zbirno prikazuje osnovne diskretizacijske značajke analiziranih modela s obzirom na pripadajući odnos stranica. Detaljniji opis diskretizacijskih značajki svakog pojedinog modela prikazan je unutar PRILOGA I (za ravne panele) i PRILOGA II (za zakrivljene panele).

**Tablica 5 Osnovne značajke razmatranih diskretiziranih modela.**

a/b	1	1.75	2.5	3.25	4
a [mm]	500	500	500	500	500
$N_a^e$	50	50	50	50	50
b [mm]	500	285.714	200	153.846	125
$N_b^e$	50	30	20	16	12
$(a/b)^e$	1:1	1:1.05	1:1	1:1.04	1:1.04

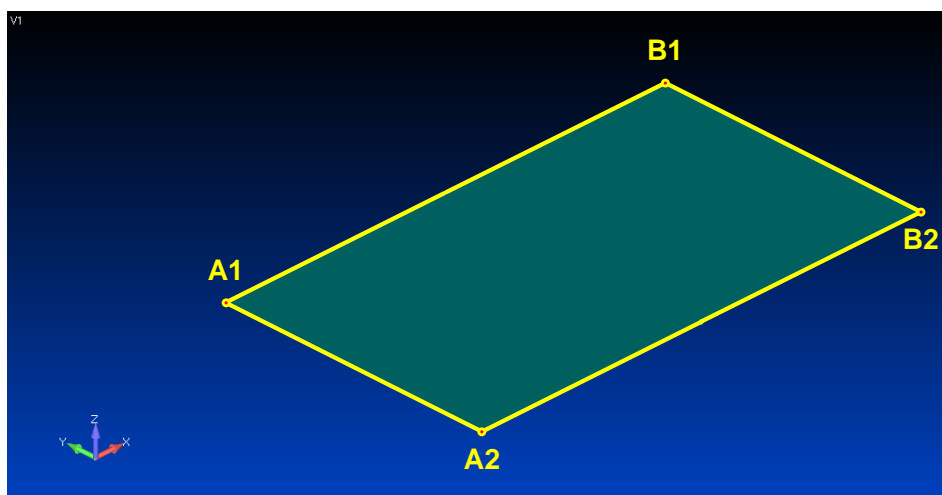
S obzirom da se u okviru ovoga rada razmatraju isključivo zglobno oslonjeni (eng. *simply supported*) ravni i zakrivljeni paneli, ograničenja poopćenih pomaka čvorova na rubovima panela su zadana kako je prikazano u Tablici 6 pri čemu su pojedini rubovi označeni sukladno prikazu na Slika 3.

**Tablica 6 Ograničenja pomaka.**

$T_x$	$T_y$	$T_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$	LOKACIJA
0	0	0	1	1	1	[A-D]; [B-C]
1	0	0	1	1	1	(A-B); (C-D)

U gornjoj tablici  $T[x, y, z]$  označava translacijske stupnjeve slobode, dok  $R[x, y, z]$  označava rotacijske stupnjeve slobode s obzirom na x-, y- i z- osi, prikazane na Slika 3. Pri tome “0” označava sprečavanje pojedinog stupnja slobode, dok “1” označava nepostojeće ograničenje pojedinog stupnja slobode. Čvorovima lociranim na uzdužnim rubovima, tj. rubovima paralelnim sa smjerom djelovanja opterećenja, spriječeni su translatorsni stupnjevi slobode u smjeru sve tri osi, pri čemu su rotacije oko svih osi dopuštene:  $T[0, 0, 0]$ ;  $R[1, 1, 1]$ . Duž poprečnih rubova spriječene su samo translacije u smjeru y- i z- osi, dok je translacija u smjeru x-osi, kao i rotacija oko sve tri osi dopuštena:  $T[1, 0, 0]$ ;  $R[1, 1, 1]$ .

Isto tako, s obzirom da se u okviru ovoga rada razmatraju isključivo jednoosno tlačno opterećeni ravni i zakrivljeni paneli, opterećenje je zadano u obliku narinutog uzdužnog pomaka po jednom od poprečnih rubova. Stoga je u svim čvorovima presjeka “A”, tj. ruba [A1-A2], zadana jednaka vrijednost opterećenja (pomak u pozitivnom smjeru osi x) od 5 mm, pri čemu je navedeni iznos odabran kako bi se provedenim analizama mogao obuhvatiti pred-kolapsni, kolapsni i post-kolapsni režim deformiranja svih razmatranih ravnih i zakrivljenih panela. Važno je naglasiti da se u istim čvorovima taj stupanj slobode istovremeno ograničava isključivo radi pravila zadavanja te vrste opterećenja u korištenom računalnom alatu.



Slika 3 Uz definiciju opterećenja i ograničenja pomaka.

## 5. ANALIZA REZULTATA RAČUNALNIH POKUSA

### 5.1. Formulacija projektnog izraza.

Nakon provedenih računalnih pokusa na temelju dobivenih vrijednosti granične nosivosti, a koristeći računalni alat Design-Expert formulirani su slijedeći izrazi:

Jednadžba odzivne plohe za ravne panele prema potpunom kvadratičnom modelu:

$$\sigma_u = -42,04715 + 34,73274 \frac{a}{b} + 32,55482 t + 16,88580 \frac{at}{b} - 6,97335 \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 4,17321 t^2 \quad (26)$$

Jednadžba odzivne plohe za ravne panele prema reduciranom kvadratičnom modelu:

$$\sigma_u = -8,33224 + 0,37905 \frac{a}{b} + 34,59365 t + 16,35188 \frac{at}{b} - 4,27177 t^2 \quad (27)$$

Jednadžba odzivne plohe za ravne panele prema potpunom kubičnom modelu:

$$\begin{aligned} \sigma_u = & 76,1928 - 153,52503 \frac{a}{b} + 63,26940 t + 33,24054 \frac{at}{b} \\ & + 66,44620 \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 23,91009 t^2 - 2,82318 \left(\frac{a}{b}\right)^2 t \\ & - 0,17118 \frac{a}{b} t^2 - 8,78144 \left(\frac{a}{b}\right)^3 + 2,01939 t^3 \end{aligned} \quad (28)$$

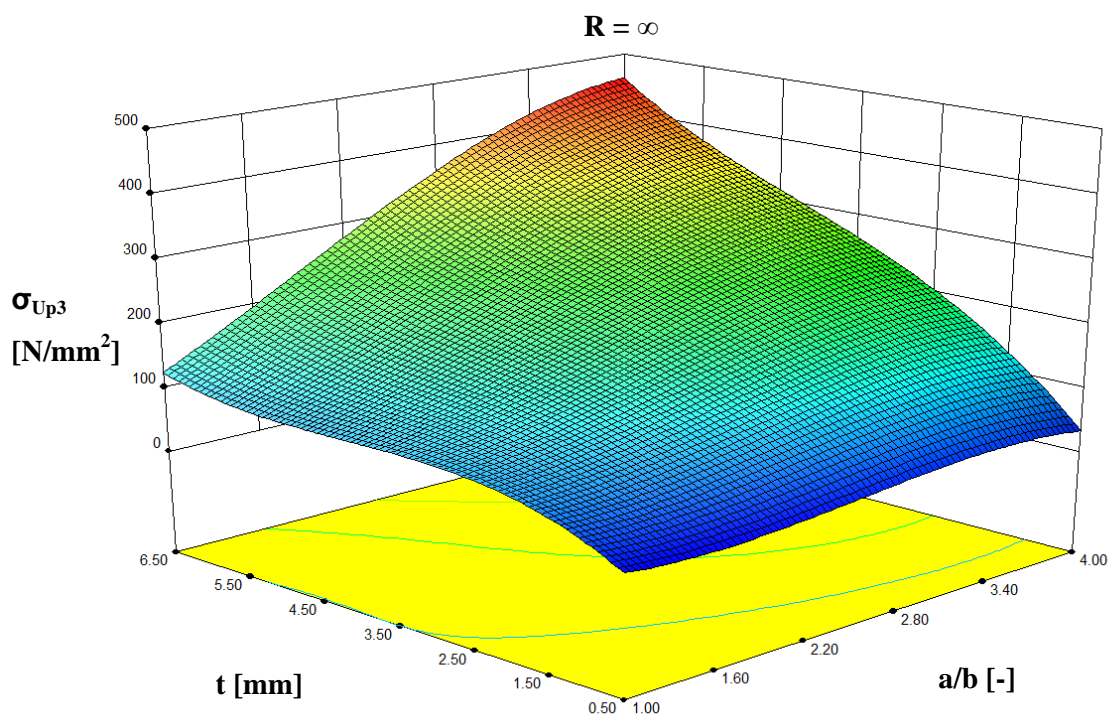
U Tablici 7 prikazani su koeficijenti determinacije te članovi jednadžbi za sve modele odzivnih ploha za ravne panele.



Tablica 7 Razmatrane odzivne plohe za ravne panele.

Model odzivne plohe	Koeficijent determinacije ( $R^2$ )	Koeficijenti i članovi jednadžbe odzivne plohe									
		$t^0 a^0 b^0$	$t^1 a^0 b^0$	$t^0 a^1 b^{-1}$	$t^1 a^1 b^{-1}$	$t^2 a^0 b^0$	$t^0 a^2 b^{-2}$	$t^2 a^1 b^{-1}$	$t^1 a^2 b^{-2}$	$t^3 a^0 b^0$	$t^0 a^3 b^{-3}$
Potpuni kubični	0.9963	76.19280	63.26940	-153.52503	33.24054	-23.91009	66.44620	-0.17118	-2.82318	2.01939	-8.78144
Potpuni kvadratični	0.9913	-42.04715	32.55482	34.73274	16.88580	-4.17321	-6.97335	0	0	0	0
Reducirani kvadratični	0.9892	-8.33224	34.59365	0.37905	16.35188	-4.27177	0	0	0	0	0

Usporedbom rezultata za ravne panele, dobivenih projektim izrazima s onim dobivenim računalnim pokusima dolazi se do zaključka da su od svih projektnih izraza najtočniji rezultati dobiveni potpunim kubičnim modelom odzivne plohe te se zbog toga taj model smatra referentnim i prikazan je grafički na Slici 4.



Slika 4 Prikaz referentne odzivne plohe za ravne panele ( $R=\infty$ ).

Jednadžba odzivne plohe za zakrivljene panele prema potpunom kvadratičnom modelu:

$$\begin{aligned}
 \sigma_u = & -162,10806 + 46,09322 t + 31,26483 \frac{a}{b} + 0,10071 r \\
 & + 11,08814 \frac{at}{b} + 0,0003040730 tr + 0,00165465 \frac{ar}{b} \\
 & - 3,82642 t^2 - 5,79566 \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 0,0000225187 r^2
 \end{aligned} \quad (29)$$

Jednadžba odzivne plohe za zakrivljene panele prema reduciranom kvadratičnom modelu:

$$\sigma_u = -31,25917 + 48,87654 t + 5,87381 \frac{a}{b} + 11,22736 \frac{at}{b} - 4,20509 t^2 \quad (30)$$

Jednadžba odzivne plohe za zakrivljene panele prema potpunom kubičnom modelu:

$$\begin{aligned} \sigma_u = & 57,94029 + 4,99138 t - 113,10206 \frac{a}{b} + 0,077865 r \\ & + 35,11364 \frac{at}{b} + 0,050761 tr - 0,11329 \frac{ar}{b} \\ & - 19,17321 t^2 + 106,35216 \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 2,95539 * 10^{-5} r^2 \\ & - 2,22387 * 10^{-3} \frac{atr}{b} - 2,42098 \frac{a}{b} t^2 + 1,78594 \\ & * 10^{-3} r t^2 + 0,28867 \left(\frac{a}{b}\right)^2 t - 1,19047 * 10^{-5} t r^2 \\ & + 4,86488 * 10^{-3} \left(\frac{a}{b}\right)^2 r + 2,0353 * 10^{-5} \frac{a}{b} r^2 \\ & + 1,46441 t^3 - 17,01827 \left(\frac{a}{b}\right)^3 + 4,20598 * 10^{-9} r^3 \end{aligned} \quad (31)$$

Jednadžba odzivne plohe za zakrivljene panele prema reduciranom kubičnom modelu:

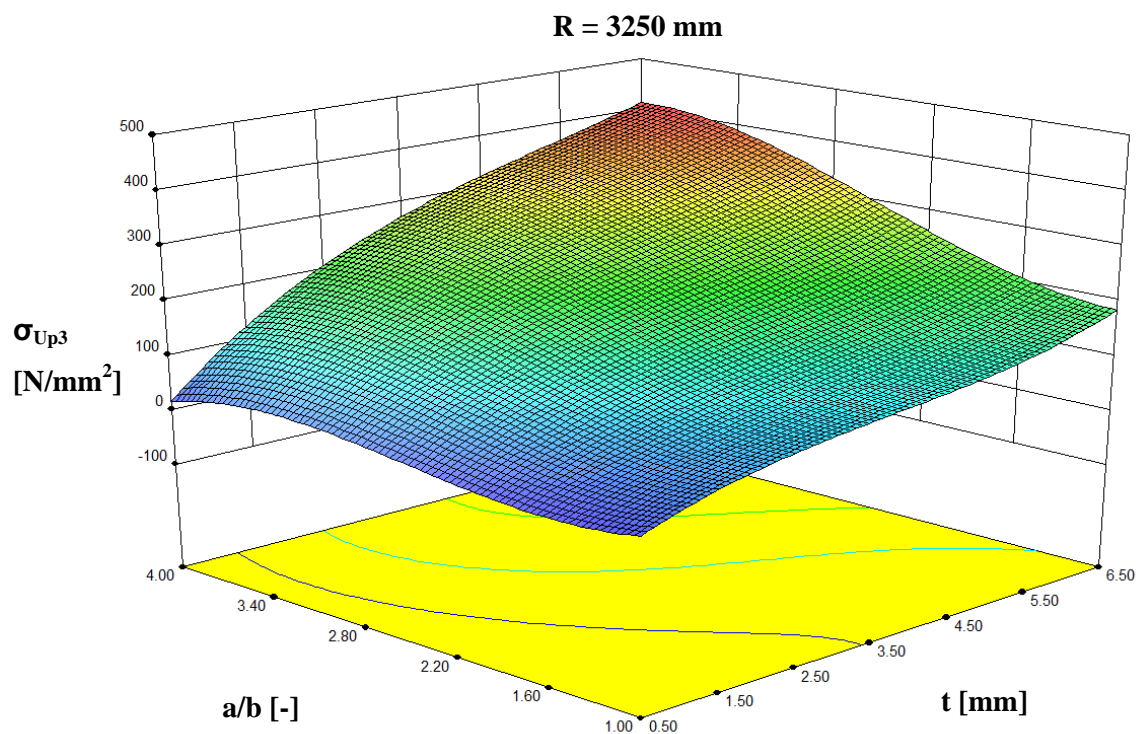
$$\begin{aligned} \sigma_u = & 35,32780 + 49,79981 t - 107,09487 \frac{a}{b} + 24,52708 \frac{at}{b} \\ & - 12,32732 t^2 + 53,51506 \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 1,78288 \frac{a}{b} t^2 \\ & + 1,21822 t^3 - 8,17878 \left(\frac{a}{b}\right)^3 \end{aligned} \quad (32)$$

U Tablici 8 prikazani su koeficijenti determinacije te članovi jednadžbi za sve modele odzivnih ploha za zakrivljene panele.

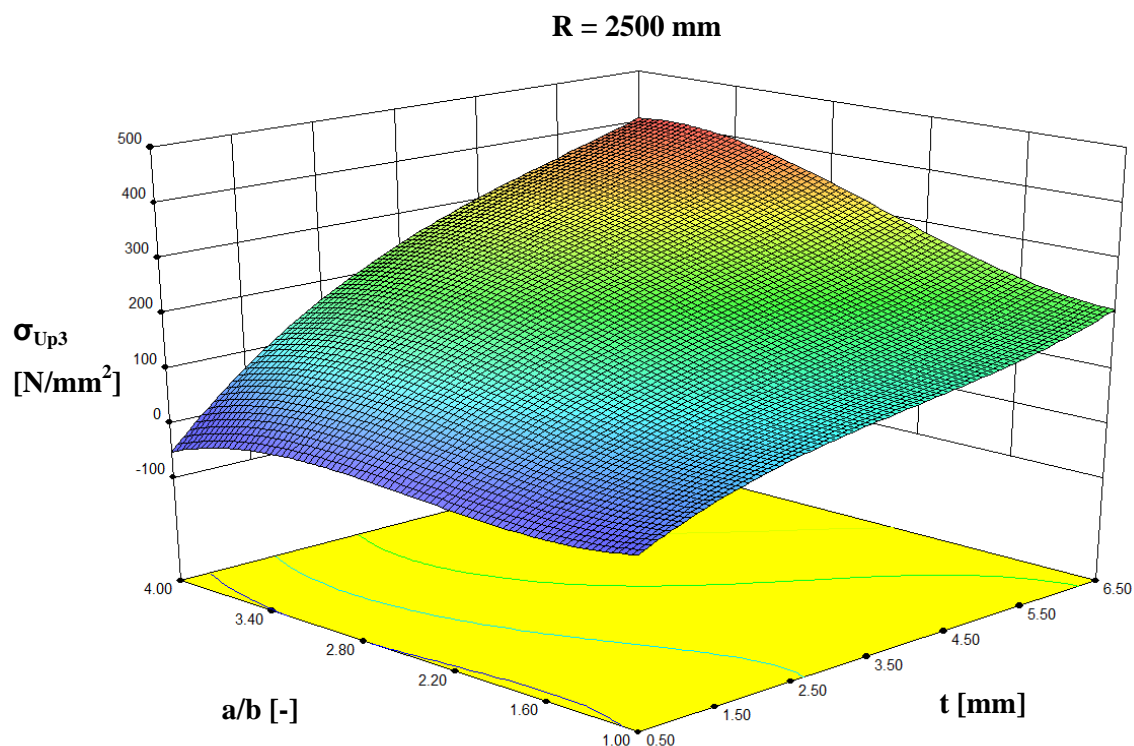
Tablica 8 Razmatrane odzivne plohe za zakrivljene panele.

Model odzivne plohe	Koeficijent determinacije ( $R^2$ )	Koeficijenti i članovi jednačine odzivne plohe																			
		$t^0_a b^0_a t^0_a$	$t^1_a b^0_a t^0_a$	$t^2_a b^0_a t^0_a$	$t^3_a b^0_a t^0_a$	$t^4_a b^0_a t^0_a$	$t^5_a b^0_a t^0_a$	$t^6_a b^0_a t^0_a$	$t^7_a b^0_a t^0_a$	$t^8_a b^0_a t^0_a$	$t^9_a b^0_a t^0_a$	$t^{10}_a b^0_a t^0_a$	$t^{11}_a b^0_a t^0_a$	$t^{12}_a b^0_a t^0_a$	$t^{13}_a b^0_a t^0_a$	$t^{14}_a b^0_a t^0_a$	$t^{15}_a b^0_a t^0_a$	$t^{16}_a b^0_a t^0_a$	$t^{17}_a b^0_a t^0_a$	$t^{18}_a b^0_a t^0_a$	$t^{19}_a b^0_a t^0_a$
Popuni kubični	1.0000	57.94029	4.99138	-113.10306	0.07786	35.11364	0.05076	-0.11329	-19.17321	-12.32732	-3.82642	-5.79566	-2.252E-05	0	0	0	0	0	0	0	0
Reducirani kubični	0.9964	35.32780	49.79981	-107.09487	0	24.52708	0	0	-12.32732	-3.82642	-5.79566	-2.252E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Popuni kvadratični	0.9893	-162.10806	46.09322	31.26483	0.10071	11.08814	3.041E-04	1.655E-03	-3.82642	-5.79566	-2.252E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reducirani kvadratični	0.9836	-31.25917	48.87654	5.87381	0	11.22736	0	0	-4.20509	-5.79566	-2.252E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

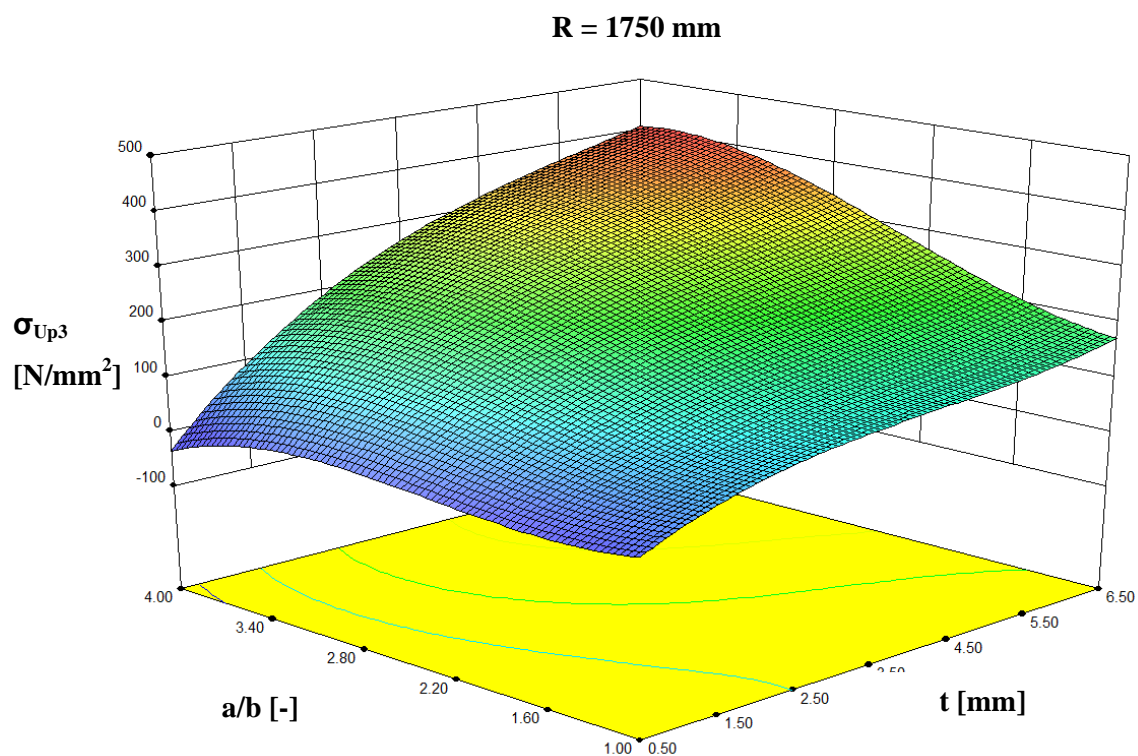
Na donjim slikama se mogu se vidjeti referentne odzivne plohe (potpuni kubični model odzivne plohe) za jednostruko zakrivljene panele, i to za najveći (Slika 5), najmanji (Slika 7) te srednji (Slika 6) radijus zakrivljenosti.



**Slika 5 Prikaz referentne odzivne plohe za gornju granicu razmatranog raspona radijusa zakrivljenosti (R=3250 mm) jednostruko zakrivljenih panela.**



**Slika 6 Prikaz referentne odzivne plohe za sredinu razmatranog raspona radijusa zakrivljenosti (R=2500 mm) jednostruko zakrivljenih panela.**



**Slika 7 Prikaz referentne odzivne plohe za donju granicu razmatranog raspona radijusa zakrivljenosti (R=1750 mm) jednostruko zakrivljenih panela.**

## 5.2. Usporedba rezultata

U prilogima I i II dane su tablice sa prikazom rezultata svih provedenih analiza ravnih panela odnosno zakrivljenih panela. Ti rezultati uspoređeni su s onima dobivenim projektnim izrazima formuliranim u prethodnom poglavlju (5.1).

U Tablici 9 prikazani su rezultati za ravne panele. Od tri provedena računalna pokusa slični su rezultati dobiveni dvijema nelinearnim analizama metodom konačnih elemenata, u kojima su korišteni različiti materijalni modeli, prema Ramberg-Osgoodu ( $\sigma_{U3}$ ) i bilinearni materijalni model ( $\sigma_{U2}$ ). Za neke panele rezultati tih dviju analiza se u potpunosti podudaraju (paneli s najmanjim iznosom debljine,  $t$ ). U usporedbi s tim vrijednostima, rezultati dobiveni prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji ( $\sigma_{U1}$ ) se uvelike razlikuju. Prema toj formulaciji za većinu panela dobivene su znatno veće (i do četiri puta) vrijednosti granične čvrstoće.

Za formuliranje projektnih izraza, kao referentne vrijednosti granične čvrstoće, uzeti su rezultati dobiveni nelinearnom analizom metodom konačnih elemenata u kojoj je korišten Ramberg-Osgoodov materijalni model. U istoj tablici (Tablica 9) dani su i rezultati dobiveni korištenjem projektnih izraza raličitih modela odzivne plohe kao i odstupanja tih rješenja od referentnih vrijednosti. Vidljivo je da se relativno odstupanje potpunog ( $\sigma_{Up2}$ ) i reduciranog ( $\sigma_{Ur2}$ ) kvadratičnog modela odzivne plohe jako mijenja od panela do panela, i dok je za neke panele manje od 1% za druge prelazi 27 % (reducirani kvadratični model) odnosno 50 % (potpuni kvadratični model). Potpuni kubični model odzivne plohe daje nešto bolje rezultate ( $\sigma_{Up3}$ ), ali i dalje su relativna odstupanja rezultata za pojedine panele prevelika da bi projektni izraz dobiven tom metodom bio prihvatljive razine točnosti.

Tablica 9. Usporedni prikaz rezultata za razmatrane ravne panele.

Geometrijske karakteristike razmatranih ravnih panela						Rezultati									
Oznaka ravnog panela	Nominalne [mm]			Normalizirane [-]		Računalni eksperimenti			Potpuni kvadratični model odzivne plohe		Reducirani kvadratični model odzivne plohe		Potpuni kubični model odzivne plohe		
	a	b	t	a/b	t/a	$\sigma_{U3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{U2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{U1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Up2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Relativno odstupanje [%]	$\sigma_{Ur2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Relativno odstupanje [%]	$\sigma_{Up3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Relativno odstupanje [%]	
	500.00	500.00	0.50	1.00	0.001	16.56	16.56	70.55	9.39	-43.30	16.45	-0.65	21.41	29.28	
	500.00	500.00	3.50	1.00	0.007	100.62	98.17	153.65	107.63	6.97	118.03	17.30	99.82	-0.79	
	500.00	285.71	0.50	1.75	0.001	19.87	19.87	93.67	27.39	37.84	22.87	15.09	14.55	-26.77	
	500.00	285.71	2.00	1.75	0.004	119.95	117.99	163.09	104.90	-12.55	101.66	-15.25	108.86	-9.25	
	500.00	285.71	6.50	1.75	0.013	228.62	227.65	261.32	224.75	-1.70	222.71	-2.59	228.84	0.09	
	500.00	200.00	0.50	2.50	0.001	24.84	24.84	102.79	37.54	51.14	29.28	17.89	28.99	16.71	
	500.00	200.00	3.50	2.50	0.007	189.29	185.55	223.87	211.77	11.88	204.44	8.01	209.44	10.65	
	500.00	153.85	2.00	3.25	0.004	181.43	177.87	205.96	155.35	-14.37	151.28	-16.61	178.87	-1.41	
500.00	153.85	5.00	3.25	0.010	339.44	327.85	306.13	330.01	-2.78	324.79	-4.32	325.79	-4.02		
500.00	125.00	0.50	4.00	0.001	33.12	33.12	124.86	34.32	3.61	42.12	27.16	32.85	-0.80		
500.00	125.00	3.50	4.00	0.007	276.11	271.83	271.92	284.53	3.05	290.86	5.34	277.23	0.41		
500.00	125.00	6.50	4.00	0.013	457.36	441.98	386.11	459.63	0.50	462.71	1.17	460.56	0.70		
Relativno odstupanje računa se na sljedeći način: % = $(\sigma_U - \sigma_{U3}) / \sigma_{U3} * 100$															



Tablica 10 prikazuje rezultate svih analiza provedenih nad zakrivljenim panelima. Ovdje, kao i kod ravnih panela može se uočiti visok stupanj sličnosti između rezultata dobivenih dvjema nelinearnim analizama metodom konačnih elemenata s korištenim različitim materijalnim modelima. Rezultati tih dviju analiza su koincidentni za najtanje zakrivljene panele (debljine  $t=0,50$  mm).

U istoj tablici prikazani su i rezultati dobiveni pomoću svih projektnih izraza za zakrivljene panele navedenih u prethodnom poglavlju (5.1.). Za dobivanje tih izraza referente su bile vrijednosti granične čvrstoće dobivene nelinearnom analizom konačnih elemenata u kojoj je korišten Ramberg-Osgoodov materijalni model.

Relativno odstupanje rezultata koje daje potpuni kvadratični model odzivne plohe ( $\sigma_{Up2}$ ), kreće se u vrlo širokom rasponu (od -105,69 do 67,6 %) iz čega se može zaključiti da projektni izraz prema tom modelu nije pouzdan te da nije prihvatljive razine točnosti za izračun granične čvrstoće zakrivljenih panela. Slično se može reći i za reducirani kvadratični model odzivne plohe koji također daje vrijednosti granične čvrstoće ( $\sigma_{Ur2}$ ) koja jako odstupaju od referentinih. Unatoč tomu što najmanje relativno odstupanje dobiveno tom metom za jedan zakrivljeni panel iznosi tek -0,02 % ona ipak nije dovoljno visoke razine točnosti budući da relativno odstupanje drugih panela doseže daleko veće vrijednosti (i do 110 %).

Za razliku od projektnih izraza dobivenih prethodno spomenutim kvadratičnim modelima odzivne plohe čiji rezultati nisu zadovoljavajući, jednadžba odzivne plohe za zakrivljene panele prema potpunom kubičnom modelu daje rezultate ( $\sigma_{Up3}$ ) koji od referentnih vrijednosti ne odstupaju više od 0,15 % iz čega se može zaključiti da projektni izraz daje rezultate više nego zadovoljavajuće točnosti.

Projektni izraz odzivne plohe prema reduciranom kubičnom modelu daje nešto bolje rezultate ( $\sigma_{Ur3}$ ) od izraza prema kvadratičnim modelima, ali relativna odstupanja rezultata su i dalje neprihvatljivo velika (najveća su za najtanje panele, do  $\pm 50$  %).

Najsloženiji model, s najviše koeficijenata i članova jednadžbe je potpuni kubični model odzivne plohe i on pruža rezultate s najmanjim relativnim odstupanjem od referentnih, kako za ravne tako i za zakrivljene panele. Ta činjenica ne iznenađuje ako se promotre Tablica 7 i Tablica 8, iz kojih je vidljivo da je koeficijent determinacije  $R^2$  i kod ravnih i kod zakrivljenih panela najveći za potpuni kubični model odzivne plohe. Općenito, model je

reprezentativniji što je koeficijent determinacije bliži jediničnoj vrijednosti; a upravo je toliko kod potpunog kubičnog modela za zakrivljene panele, za kojeg je već naglašeno da pruža najbolje rezultate.

Tablica 10. Usporedni prikaz rezultata za razmatrane zakrivljene panele.

Geometrijske karakteristike razmatranih zakrivljenih panela								Rezultati									
Nominalne [mm]				Normalizirane [-]				Računali eksperimenti		Potpuni kvadratični model odzivne plohe		Reducirani kvadratični model odzivne plohe		Potpuni kubični model odzivne plohe		Reducirani kubični model odzivne plohe	
a	b	t	r	a/b	t/a	r/a		$\sigma_{U3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{U2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Up2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Relativno odstupanje [%]	$\sigma_{Ur2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Relativno odstupanje [%]	$\sigma_{Up3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Relativno odstupanje [%]	$\sigma_{Ur3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Relativno odstupanje [%]
CP-AR100-T050-R2125	500.00	500.00	0.50	2125.00	1.00	0.001	4.25	8.66	8.66	7.16	-17.35	3.62	-58.25	8.66	0.05	7.36	-15.04
CP-AR100-T050-R2875	500.00	500.00	0.50	2875.00	1.00	0.001	5.75	7.04	7.04	-0.40	-105.69	3.62	-48.65	7.05	0.08	7.36	4.50
CP-AR100-T350-R1750	500.00	500.00	3.50	1750.00	1.00	0.007	3.50	122.66	120.30	128.66	4.89	133.47	8.81	122.66	0.01	113.09	-7.80
CP-AR100-T350-R3250	500.00	500.00	3.50	3250.00	1.00	0.007	6.50	104.79	102.48	114.91	9.66	133.47	27.37	104.80	0.01	113.09	7.93
CP-AR100-T650-R2125	500.00	500.00	6.50	2125.00	1.00	0.013	4.25	201.74	200.27	193.41	-4.13	187.62	-7.00	201.75	0.00	195.09	-3.30
CP-AR100-T650-R3250	500.00	500.00	6.50	3250.00	1.00	0.013	6.50	187.66	186.51	174.63	-6.94	187.62	-0.02	187.66	0.00	195.09	3.96
CP-AR175-T200-R1750	500.00	285.71	2.00	1750.00	1.75	0.004	3.50	107.35	103.66	103.96	-3.16	99.25	-7.55	107.36	0.01	101.37	-5.57
CP-AR175-T500-R2875	500.00	285.71	5.00	2875.00	1.75	0.010	5.75	185.81	182.15	222.79	19.90	216.52	16.53	185.82	0.01	197.68	6.39
CP-AR250-T200-R2125	500.00	200.00	2.00	2125.00	2.50	0.004	4.25	138.60	135.49	134.56	-2.92	120.49	-13.06	138.61	0.01	139.11	0.37
CP-AR250-T350-R3250	500.00	200.00	3.50	3250.00	2.50	0.007	6.50	205.00	201.13	197.66	-3.58	201.22	-1.84	205.00	0.00	209.80	2.34
CP-AR250-T500-R1750	500.00	200.00	5.00	1750.00	2.50	0.010	3.50	272.31	272.37	270.42	-0.70	263.02	-3.41	272.33	0.00	262.52	-3.60
CP-AR250-T650-R2500	500.00	200.00	6.50	2500.00	2.50	0.013	5.00	326.28	321.39	324.27	-0.62	305.90	-6.25	326.29	0.00	321.94	-1.33
CP-AR325-T050-R1750	500.00	153.85	0.50	1750.00	3.25	0.001	3.50	21.09	21.09	35.35	67.60	29.46	39.68	21.10	0.05	32.14	52.38
CP-AR325-T200-R2875	500.00	153.85	2.00	2875.00	3.25	0.004	5.75	166.86	162.34	147.86	-11.39	141.74	-15.06	166.88	0.01	168.04	0.71
CP-AR325-T500-R2875	500.00	153.85	5.00	2875.00	3.25	0.010	5.75	324.91	319.53	316.51	-2.59	309.53	-4.74	324.92	0.00	318.55	-1.96
CP-AR400-T050-R3250	500.00	125.00	0.50	3250.00	4.00	0.001	6.50	17.98	17.98	25.95	44.31	38.08	111.80	18.00	0.15	8.99	-50.00
CP-AR400-T350-R1750	500.00	125.00	3.50	1750.00	4.00	0.007	3.50	280.41	280.14	260.63	-7.05	268.97	-4.08	280.42	0.01	271.29	-3.25
CP-AR400-T350-R2500	500.00	125.00	3.50	2500.00	4.00	0.007	5.00	259.28	259.28	270.15	4.19	268.97	3.74	259.30	0.01	271.29	4.63
CP-AR400-T650-R1750	500.00	125.00	6.50	1750.00	4.00	0.013	3.50	408.45	401.33	418.77	2.53	424.18	3.85	408.46	0.00	413.57	1.25
CP-AR400-T650-R3250	500.00	125.00	6.50	3250.00	4.00	0.013	6.50	414.05	407.76	413.84	-0.05	424.18	2.45	414.07	0.00	413.57	-0.12
Relativno odstupanje računa se na sljedeći način: % = $(\sigma_U - \sigma_{U3}) / \sigma_{U3} * 100$																	

## 6. ZAKLJUČAK

U okviru ovoga rada formulirano je više projektnih izraza pomoću kojihbi se mogla odrediti granična nosivost jednoosno tlačno opterećenih elemenata oplata zrakoplova. U praksi, analize sličnih problema zbog raznih nelinearnosti (geometrijske, materijalne) mogu biti računalno i vremenski vrlo zahtjevne, a proračuni matematički kompleksni. Stoga se nameće potreba za pronalaskom jednostavnijih rješenja uz zadržavanje visoke razine točnosti kako bi se moglo uštedjeti na vremenu i računskim resursima.

Provedene su numeričke simulacije koristeći računalni alat FEMAP/NX Nastran prema prethodno identificiranom planu pokusa s obzirom na relevantne geometrijske varijable razmatranih elemenata oplata (debljina, odnos stranica i radijus zakrivljenosti). U poglavlju u kojem je opisana provedba računalnih pokusa naglašena je potreba za što boljim opisom nelinearne veze između naprezanja i deformacija korištenog materijala te je prema tomu nelinearna analiza metodom konačnih elemenata sa Ramberg – Osgoodovim materijalnim modelom ocijenjena kao najbolja među razmatranima su vrijednosti granične nosivosti dobivene tom analizom uzete kao referentne prilikom provedbe regresijske analize s ciljem formulacije traženog projektnog izraza.

U poglavlju 5.2 prikazani su rezultati svih provedenih računalnih pokusa kao i oni dobiveni projektnim izrazima. Usporedbom rezultata dobivenih za ravne panele može se zaključiti da niti jedan od projektnih izraza ne pruža dovoljnu razinu točnosti te ne bi mogao zamijeniti računalne pokuse. Potpuni kvadratični model odzivne plohe i reducirani kvadratični model odzivne plohe daju vrijednosti granične nosivosti koje uvelike odstupaju od referentnih. Odstupanja jako variraju za različite panele te se ne može reći da su rezultati točniji za panele određene debljine ili odnosa duljina stranica panela. Najsloženiji među tri izraza za ravne panele, potpuni kubični model odzivne plohe, pruža rezultate s najmanjim odstupanjem od referentnih, ali i dalje nedovoljno dobre. Kao i kod prva dva modela, rezultati odstupaju od referentnih kod panela svih debljina i odnosa stranica te se ne bi mogao primjenjivati niti za neku određenu skupinu panela. Za zakrivljene panele predložena su četiri projektna izraza. Kao i kod ravnih panela rezultati dobiveni prema potpunom kvadratičnom modelu odzivne plohe kao i oni prema reduciranom kvadratičnom modelu odzivne plohe odstupaju od referentnih i to za panele svih debljina i za sve odnose duljina stranica panela

zbog čega se može zaključiti da niti jedan od navedenih izraza nije prihvatljiv. Za razliku od projektnih izraza dobivenih prethodno spomenutim kvadratičnim modelima odzivne plohe izraz prema potpunom kubičnom modelu daje rezultate vrlo visoke razine točnosti; odstupanja od referentih rezultata su zanemariva što ovaj izraz čini dovoljno dobrim za primjenu, to jest za izračun granične čvrstoće zakrivljenih panela. Četvrti predloženi izraz za zakrivljene panele dobiven je prema reduciranom kubičnom modelu. Usporedbom rezultata koje pruža taj izraz s onima dobivenima ostalim projektnim izrazima te referentnim rezultatima, može se zaključiti da je izraz prema reduciranom kubičnom modelu bolji od dvaju izraza prema kvadratičnim modelima, ali lošiji od izraza prema potpunom kubičnom modelu te su odstupanja rezultata prevelika. Analizom rezultata dolazi se do zaključka da složeniji modeli, oni s većim koeficijentom determinacije, pružaju točnije rezultate te se nameće ideja da bi se povećanjem broja računalnih pokusa, tj. uvođenjem dodatnih koeficijenata i članova jednadžbe odzivne plohemoglo doći i do izraza pomoću kojeg bi se s dovoljnom točnošću mogla računati granična nosivost ravnih panela.

## **7. PRILOZI**

- I. PRILOG I
- II. PRILOG II
- III. CD-R disc

## **PRILOG I**

Tablica 11. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR100-T050.

**Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500.00	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 500.00	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 0.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 250.00	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34.00	-
$\alpha$	= 1.00	-			

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10.00	mm
$N_b^e$	= 50	-	$b^e$	= 10.00	mm
$N^e$	= 2500 (Ukupni broj SS: 15606)		$\alpha^e$	= 1.00	-

**Elastična analiza izvijanja:**

$m$	= 1	-	$k$	= 4.00	-
$\sigma_E$	= 0.27	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 68.09	N
$\varepsilon_E$	= 0.000004	-	$u_E$	= 0.00	mm

**Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti:**

$E_s$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\nu$	= 0.33	-
$E_t$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\eta$	= 1.00	-
$\sigma_{CR}$	= 0.27	N/mm <sup>2</sup>	$F_{CR}$	= 68.09	N
$\varepsilon_{CR}$	= 0.000004	-	$u_{CR}$	= 0.00	mm

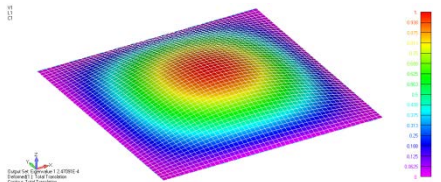
**Granična nosivost prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji:**

$C_1$	= 0.78	-	$C_2$	= 0.80	-
$\sigma_{U1}$	= 70.55	N/mm <sup>2</sup>	$F_{U1}$	= 17637.39	N
$\varepsilon_{U1}$	= 0.000956	-	$u_{U1}$	= 0.48	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.000247091$ ;  $m = 1$ )

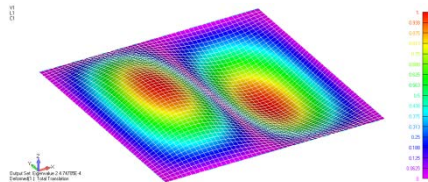
$\sigma_{E1}$	= 0.18	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000002	-
$F_{E1}$	= 45.57	N
$u_{E1}$	= 0.00	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.000474705$ ;  $m = 2$ )

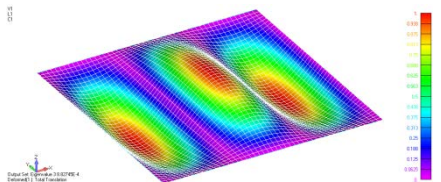
$\sigma_{E2}$	= 0.35	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000005	-
$F_{E2}$	= 87.55	N
$u_{E2}$	= 0.00	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.000882745$ ;  $m = 3$ )

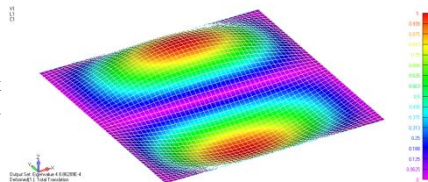
$\sigma_{E3}$	= 0.65	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000009	-
$F_{E3}$	= 162.81	N
$u_{E3}$	= 0.00	mm

Treći oblik izvijanja.

4. način izvijanja ( $\lambda = 0.000886289$ ;  $m = 2$ )

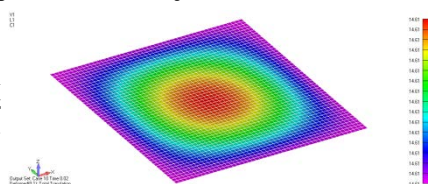
$\sigma_{E4}$	= 0.64	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000009	-
$F_{E4}$	= 159.15	N
$u_{E4}$	= 0.00	mm

Četvrti oblik izvijanja.

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 27.15	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.010000	-
$F_{U2}$	= 6786.56	N
$u_{U2}$	= 5	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).



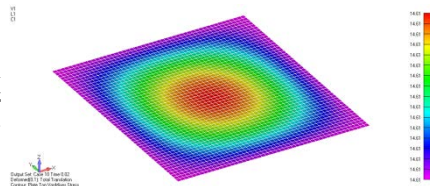
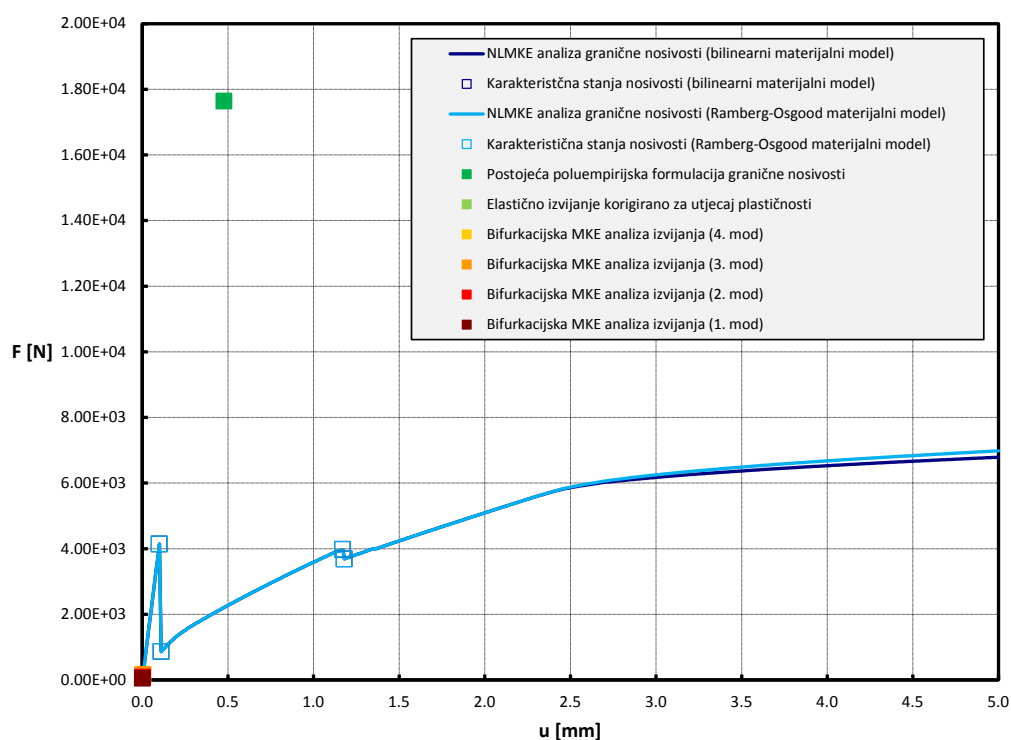
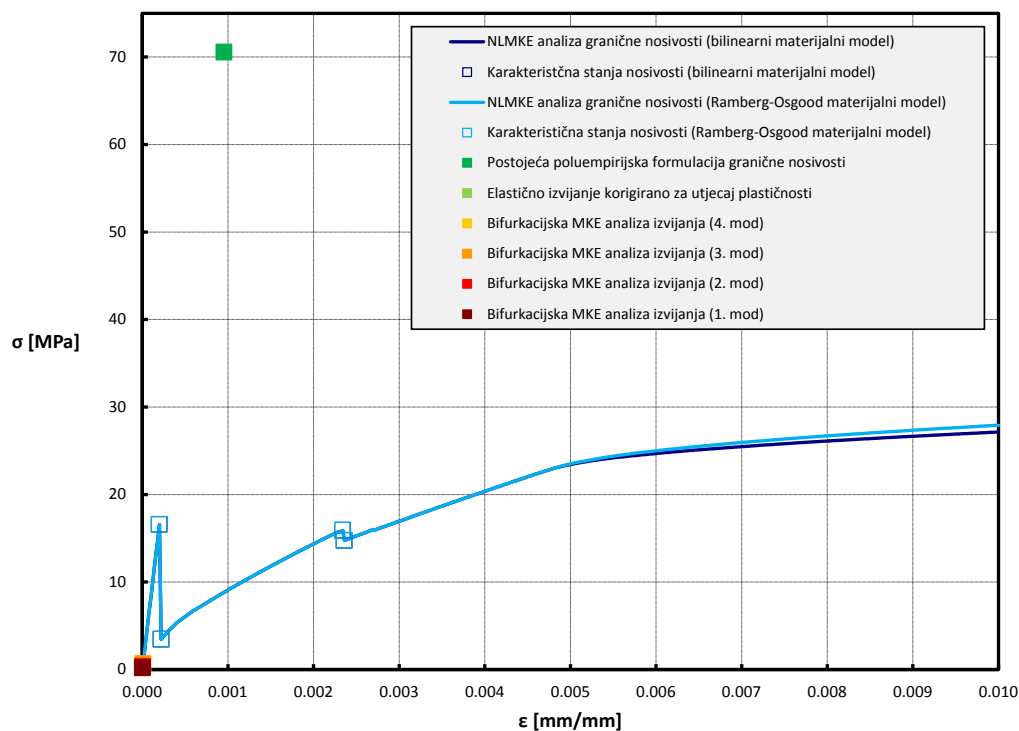


Tablica 12 Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR100-T050 (nastavak).

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 16.56	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.010000	-
$F_{U3}$	= 6981.06	N
$u_{U3}$	= 5.00	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

Tablica 13. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR100-T350.

**Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500.00	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 500.00	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 3.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 1750.00	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34.00	-
$\alpha$	= 1.00	-			

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10.00	mm
$N_b^e$	= 50	-	$b^e$	= 10.00	mm
$N^e$	= 2500 (Ukupni broj SS: 15606)		$\alpha^e$	= 1.00	-

**Elastična analiza izvijanja:**

$m$	= 1	-	$k$	= 4.00	-
$\sigma_E$	= 13.35	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 23355.49	N
$\varepsilon_E$	= 0.000181	-	$u_E$	= 0.09	mm

**Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti:**

$E_s$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\nu$	= 0.33	-
$E_t$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\eta$	= 1.00	
$\sigma_{CR}$	= 13.35	N/mm <sup>2</sup>	$F_{CR}$	= 23355.49	N
$\varepsilon_{CR}$	= 0.000181	-	$u_{CR}$	= 0.09	mm

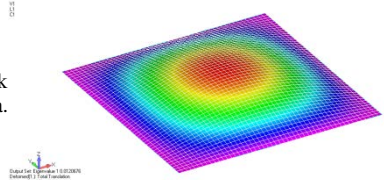
**Granična nosivost prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji:**

$C_1$	= 0.78	-	$C_2$	= 0.80	-
$\sigma_{U1}$	= 153.65	N/mm <sup>2</sup>	$F_{U1}$	= 268888.17	N
$\varepsilon_{U1}$	= 0.002083	-	$u_{U1}$	= 1.04	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.120676$ ;  $m = 1$ )

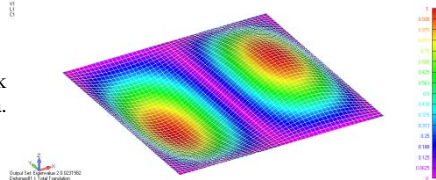
$\sigma_{E1}$	= 8.90	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000121	-
$F_{E1}$	= 15579.80	N
$u_{E1}$	= 0.06	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.0231982$ ;  $m = 2$ )

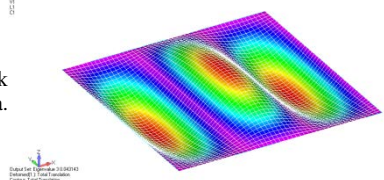
$\sigma_{E2}$	= 17.11	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000232	-
$F_{E2}$	= 29949.89	N
$u_{E2}$	= 0.12	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.043143$ ;  $m = 3$ )

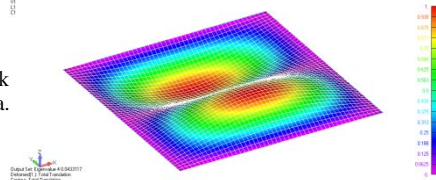
$\sigma_{E3}$	= 31.83	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000431	-
$F_{E3}$	= 55699.49	N
$u_{E3}$	= 0.22	mm

Treći oblik izvijanja.

4. način izvijanja ( $\lambda = 0.0433117$ ;  $m = 2$ )

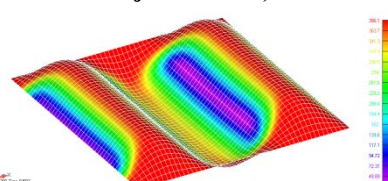
$\sigma_{E4}$	= 31.95	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000433	-
$F_{E4}$	= 55917.29	N
$u_{E4}$	= 0.22	mm

Četvrti oblik izvijanja.

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 98.17	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.005820	-
$F_{U2}$	= 171792.52	N
$u_{U2}$	= 2.91	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprežanja u N/mm<sup>2</sup>).

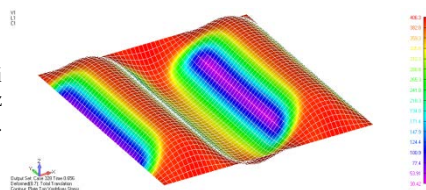
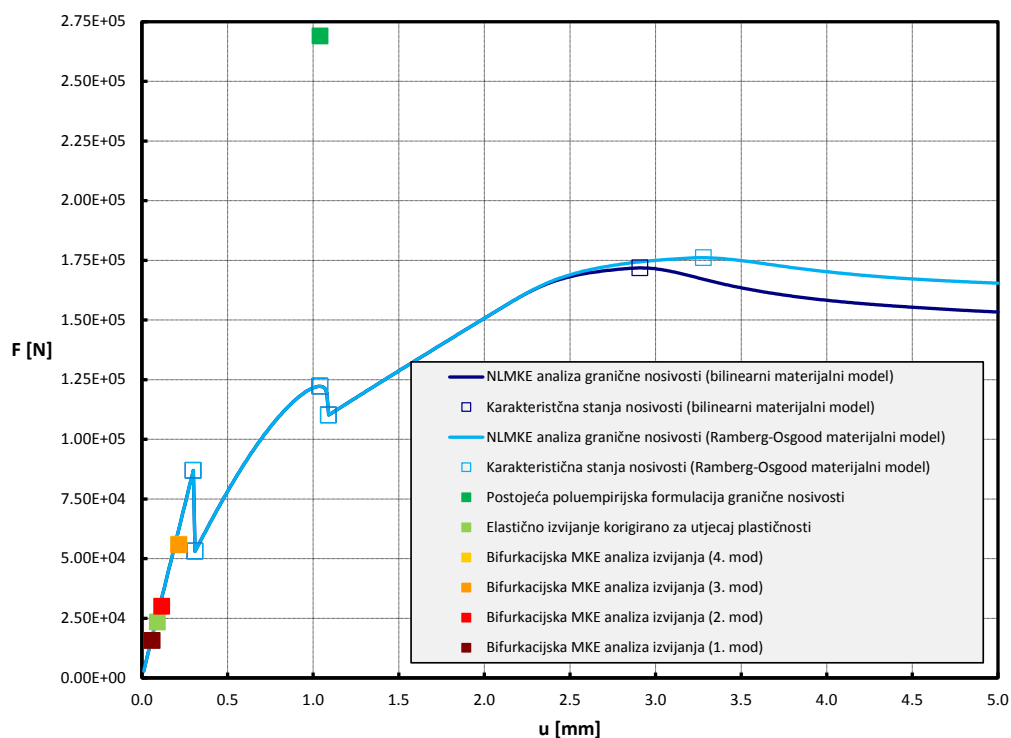
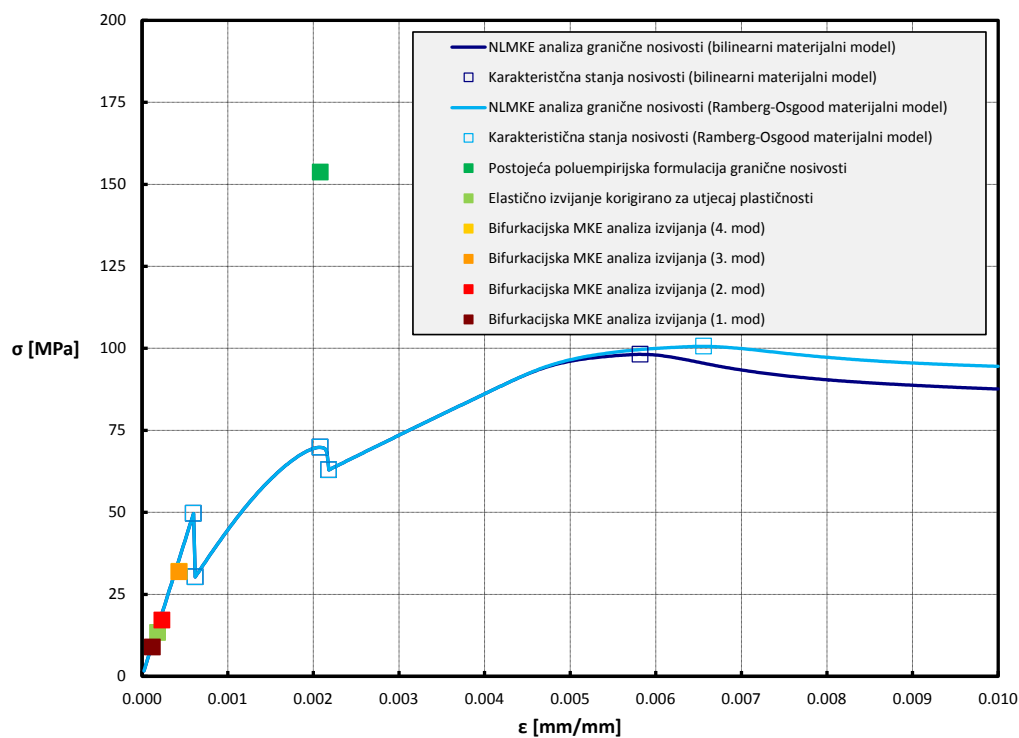


Tablica 14. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR100-T350 (nastavak).

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$$\begin{aligned}
 \sigma_{U3} &= 100.62 \quad \text{N/mm}^2 \\
 \varepsilon_{U3} &= 0.006560 \quad - \\
 F_{U3} &= 176080.57 \quad \text{N} \\
 u_{U3} &= 3.28 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

Tablica 15. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR175-T050.

**Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500.00	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 285.714	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 0.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 142.86	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34.00	-
$\alpha$	= 1.75	-			

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10.00	mm
$N_b^e$	= 30	-	$b^e$	= 9.584	mm
$N^e$	= 1500 (Ukupni broj SS: 9486)		$\alpha^e$	= 1.05	-

**Elastična analiza izvijanja:**

$m$	= 1	-	$k$	= 5.39	-
$\sigma_E$	= 1.12	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 160.54	N
$\varepsilon_E$	= 0.000015	-	$u_E$	= 0.01	mm

**Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti:**

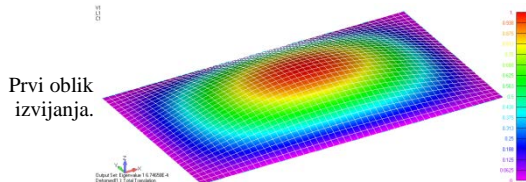
$E_s$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\nu$	= 0.33	-
$E_t$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\eta$	= 1.00	-
$\sigma_{CR}$	= 1.12	N/mm <sup>2</sup>	$F_{CR}$	= 160.54	N
$\varepsilon_{CR}$	= 0.000015	-	$u_{CR}$	= 0.01	mm

**Granična nosivost prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji:**

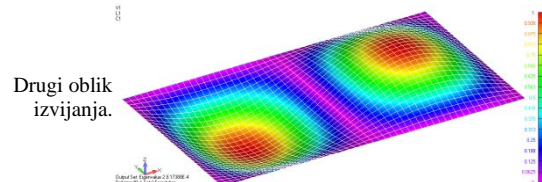
$C_1$	= 0.78	-	$C_2$	= 0.80	-
$\sigma_{U1}$	= 93.67	N/mm <sup>2</sup>	$F_{U1}$	= 13381.40	N
$\varepsilon_{U1}$	= 0.001270	-	$u_{U1}$	= 0.63	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.000674658$ ;  $m = 1$ )

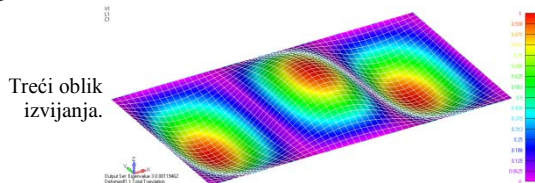
$\sigma_{E1}$	= 0.50	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000007	-
$F_{E1}$	= 71.10	N
$u_{E1}$	= 0.00	mm

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.000817388$ ;  $m = 2$ )

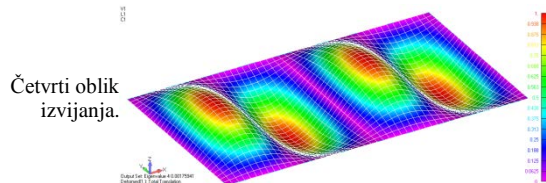
$\sigma_{E2}$	= 0.60	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000008	-
$F_{E2}$	= 86.15	N
$u_{E2}$	= 0.00	mm

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.00119462$ ;  $m = 3$ )

$\sigma_{E3}$	= 0.88	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000012	-
$F_{E3}$	= 125.90	N
$u_{E3}$	= 0.01	mm

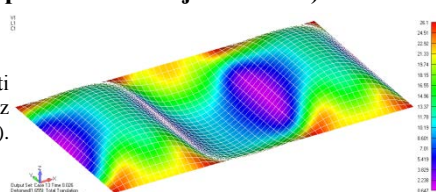
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.00175941$ ;  $m = 4$ )

$\sigma_{E4}$	= 1.30	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000018	-
$F_{E4}$	= 185.43	N
$u_{E4}$	= 0.01	mm

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 45.71	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.010000	-
$F_{U2}$	= 6529.96	N
$u_{U2}$	= 5.00	mm

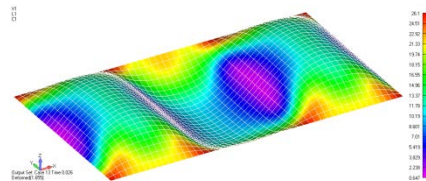
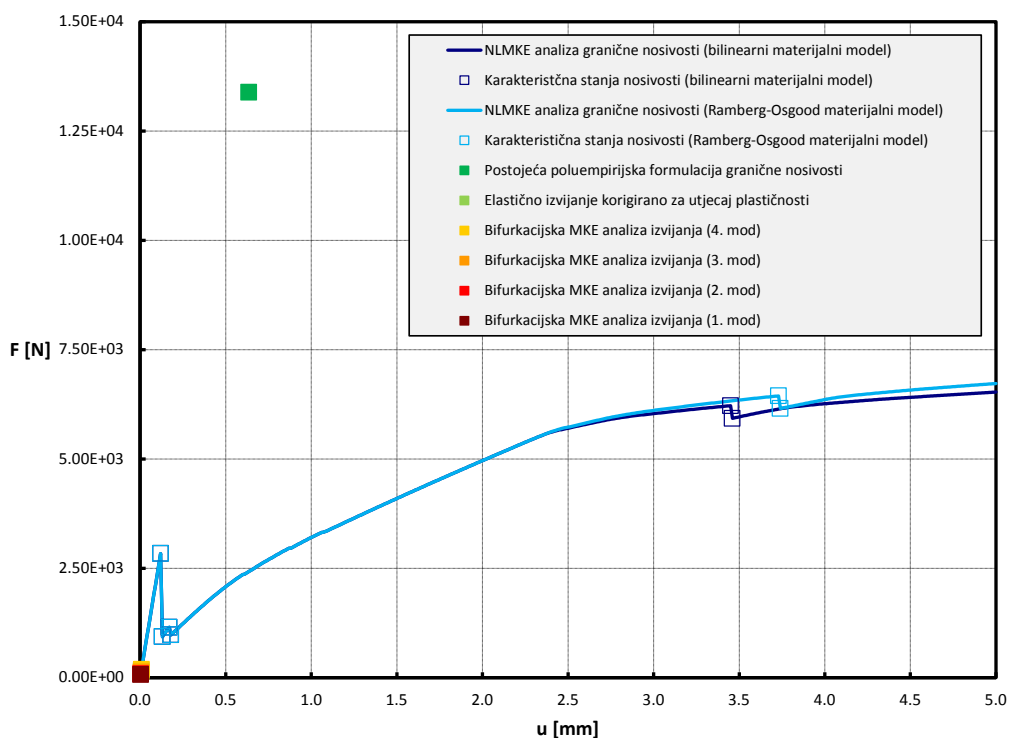
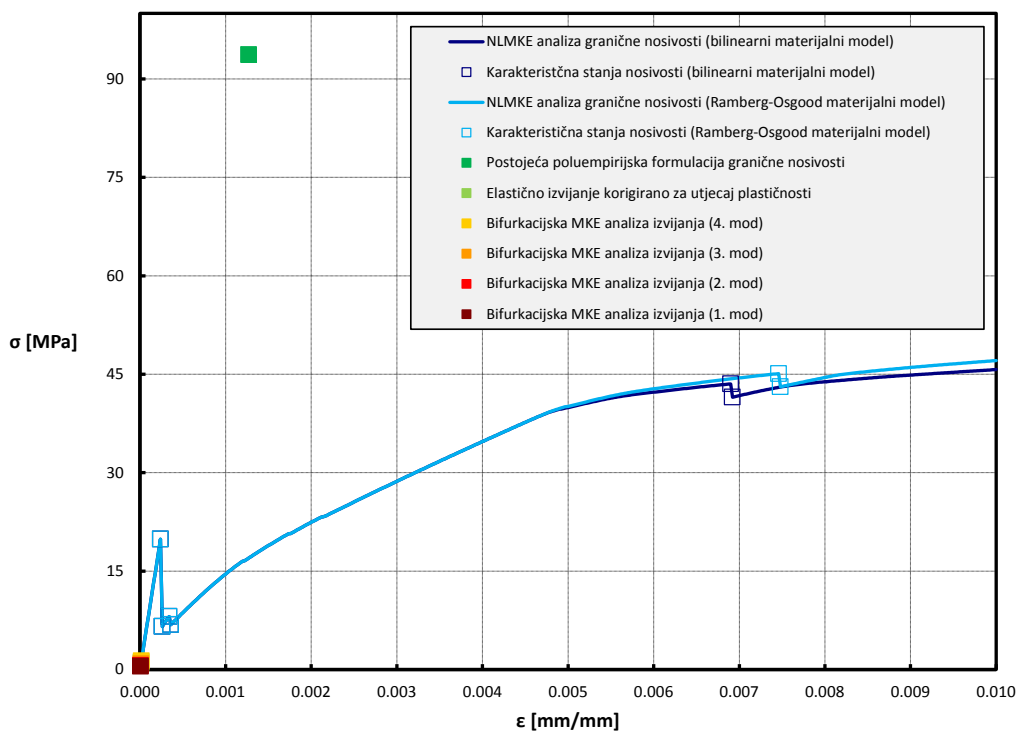
Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM napreznja u N/mm<sup>2</sup>).



**Tablica 16. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR175-T050 (nastavak).****Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$$\begin{aligned}
 \sigma_{U3} &= 19.87 & \text{N/mm}^2 \\
 \varepsilon_{U3} &= 0.010000 & - \\
 F_{U3} &= 6724.95 & \text{N} \\
 u_{U3} &= 5.00 & \text{mm}
 \end{aligned}$$

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

Tablica 17. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR175-T200.

**Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500.00	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 285.714	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 2.00	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 571.43	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34.00	-
$\alpha$	= 1.75	-			

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10.00	mm
$N_b^e$	= 30	-	$b^e$	= 9.584	mm
$N^e$	= 1500 (Ukupni broj SS: 9486)		$\alpha^e$	= 1.05	-

**Elastična analiza izvijanja:**

$m$	= 1	-	$k$	= 5.39	-
$\sigma_E$	= 17.98	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 10274.59	N
$\varepsilon_E$	= 0.000244	-	$u_E$	= 0.12	mm

**Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti:**

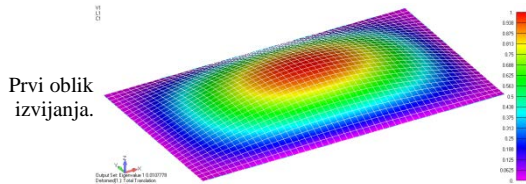
$E_s$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\nu$	= 0.33	-
$E_t$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\eta$	= 1.00	-
$\sigma_{CR}$	= 17.98	N/mm <sup>2</sup>	$F_{CR}$	= 10274.59	N
$\varepsilon_{CR}$	= 0.000244	-	$u_{CR}$	= 0.12	mm

**Granična nosivost prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji:**

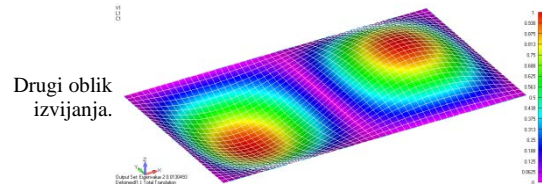
$C_1$	= 0.78	-	$C_2$	= 0.80	-
$\sigma_{U1}$	= 163.09	N/mm <sup>2</sup>	$F_{U1}$	= 93193.48	N
$\varepsilon_{U1}$	= 0.002211	-	$u_{U1}$	= 1.11	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.0107778$ ;  $m = 1$ )

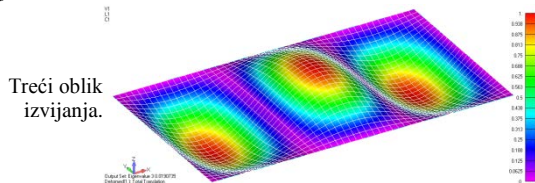
$\sigma_{E1}$	= 7.95	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000108	-
$F_{E1}$	= 4543.54	N
$u_{E1}$	= 0.05	mm

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.0130493$ ;  $m = 2$ )

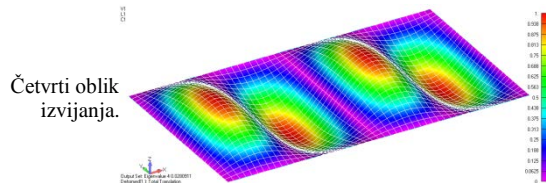
$\sigma_{E2}$	= 9.63	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000130	-
$F_{E2}$	= 5501.13	N
$u_{E2}$	= 0.07	mm

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.0190735$ ;  $m = 3$ )

$\sigma_{E3}$	= 14.07	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000191	-
$F_{E3}$	= 8040.72	N
$u_{E3}$	= 0.10	mm

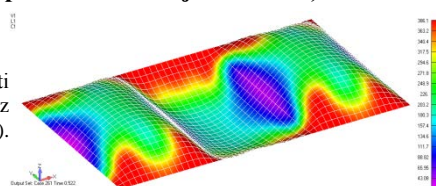
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.0280911$ ;  $m = 4$ )

$\sigma_{E4}$	= 20.72	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000281	-
$F_{E4}$	= 11842.22	N
$u_{E4}$	= 0.14	mm

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 117.99	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.005220	-
$F_{U2}$	= 67421.81	N
$u_{U2}$	= 2.61	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprežanja u N/mm<sup>2</sup>).

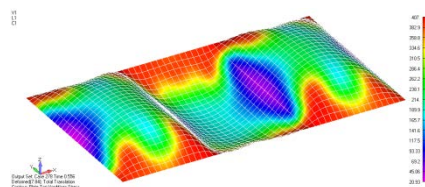
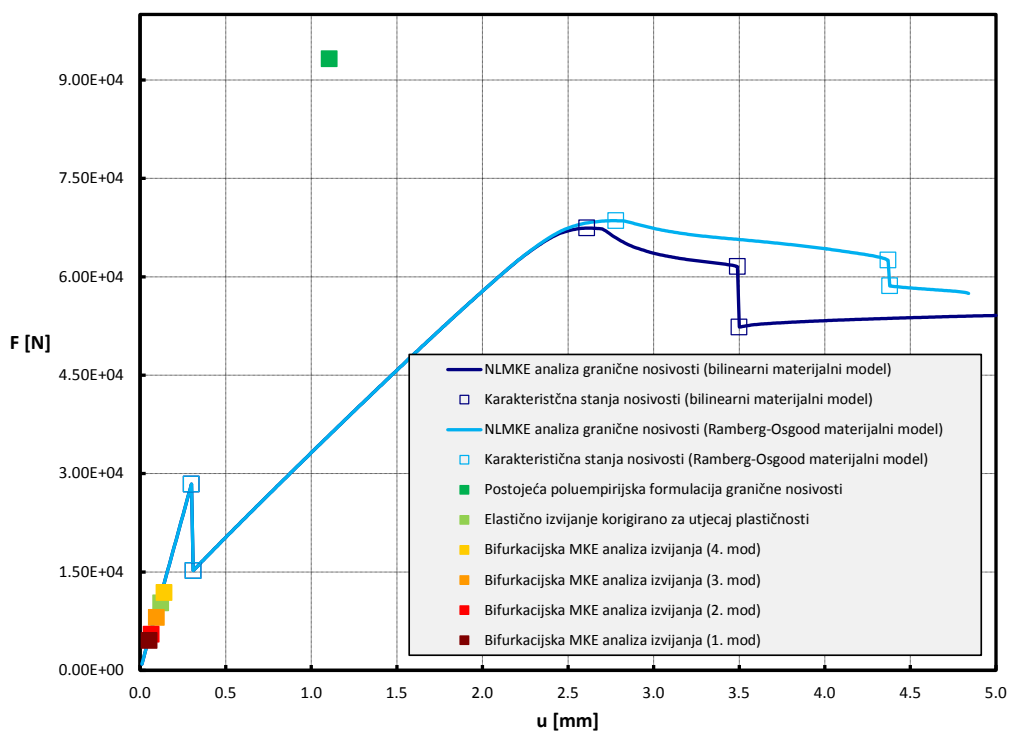
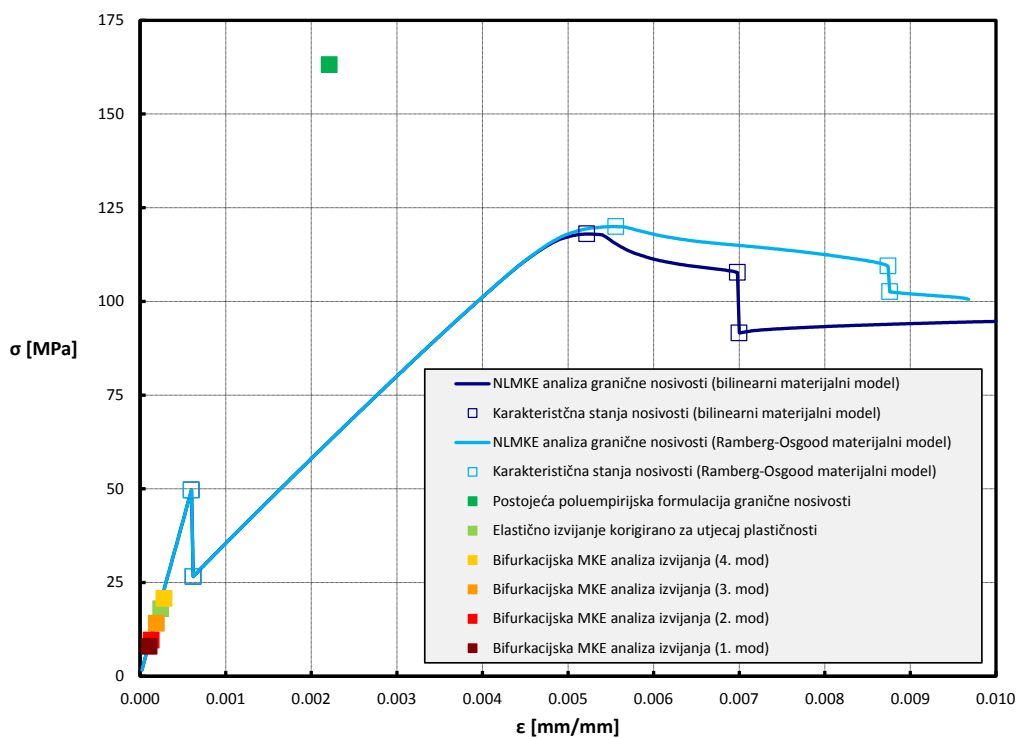




**Tablica 18. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR175-T200 (nastavak).****Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$$\begin{aligned}
 \sigma_{U3} &= 119.95 & \text{N/mm}^2 \\
 \varepsilon_{U3} &= 0.005560 & - \\
 F_{U3} &= 68545.06 & \text{N} \\
 u_{U3} &= 2.78 & \text{mm}
 \end{aligned}$$

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

Tablica 19 Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR175-T650.

**Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500.00	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 285.714	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 6.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 1857.14	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34.00	-
$\alpha$	= 1.75	-			

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10.00	mm
$N_b^e$	= 30	-	$b^e$	= 9.584	mm
$N^e$	= 1500 (Ukupni broj SS: 9486)		$\alpha^e$	= 1.05	-

**Elastična analiza izvijanja:**

$m$	= 1	-	$k$	= 5.39	-
$\sigma_E$	= 189.92	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 352707.39	N
$\varepsilon_E$	= 0.002574	-	$u_E$	= 1.29	mm

**Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti:**

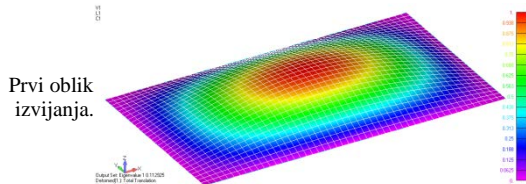
$E_s$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\nu$	= 0.33	-
$E_t$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\eta$	= 1.00	-
$\sigma_{CR}$	= 189.92	N/mm <sup>2</sup>	$F_{CR}$	= 352707.39	N
$\varepsilon_{CR}$	= 0.002574	-	$u_{CR}$	= 1.29	mm

**Granična nosivost prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji:**

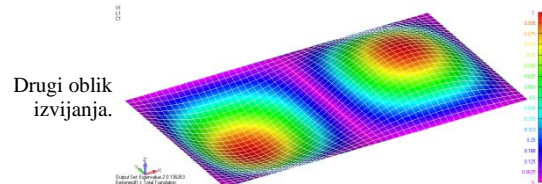
$C_1$	= 0.78	-	$C_2$	= 0.80	-
$\sigma_{U1}$	= 261.32	N/mm <sup>2</sup>	$F_{U1}$	= 485313.37	N
$\varepsilon_{U1}$	= 0.003542	-	$u_{U1}$	= 1.77	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.112925$ ;  $m = 1$ )

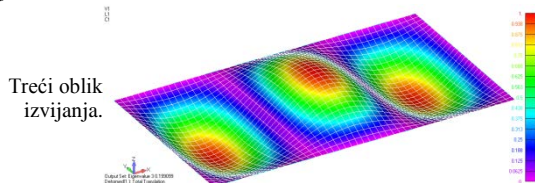
$\sigma_{E1}$	= 83.31	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.001129	-
$F_{E1}$	= 154716.93	N
$u_{E1}$	= 0.56	mm

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.136263$ ;  $m = 2$ )

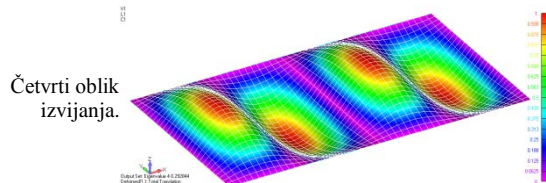
$\sigma_{E2}$	= 100.53	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.001363	-
$F_{E2}$	= 186691.99	N
$u_{E2}$	= 0.68	mm

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.199099$ ;  $m = 3$ )

$\sigma_{E3}$	= 146.88	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.001991	-
$F_{E3}$	= 272782.70	N
$u_{E3}$	= 1.00	mm

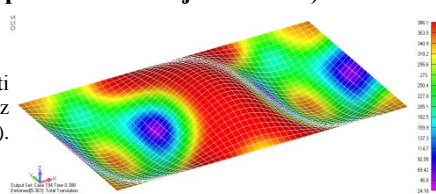
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.292844$ ;  $m = 4$ )

$\sigma_{E4}$	= 216.04	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.002928	-
$F_{E4}$	= 401221.38	N
$u_{E4}$	= 1.46	mm

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 227.65	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.003780	-
$F_{U2}$	= 422778.10	N
$u_{U2}$	= 1.89	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprežanja u N/mm<sup>2</sup>).

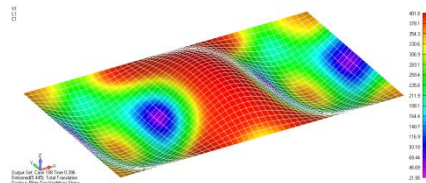
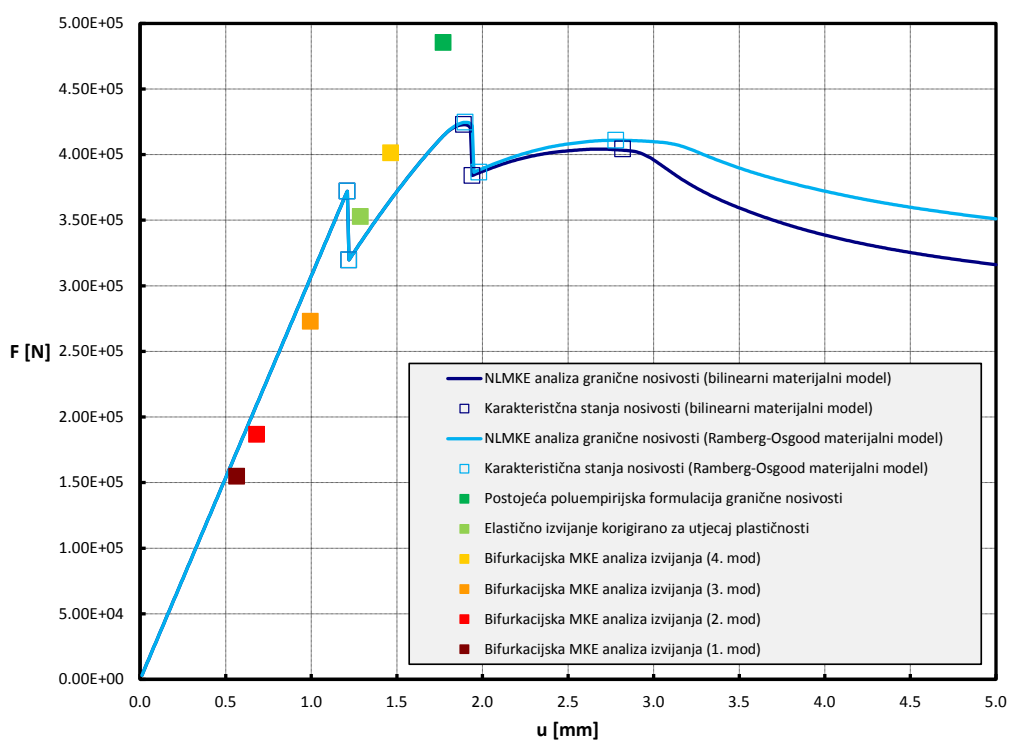
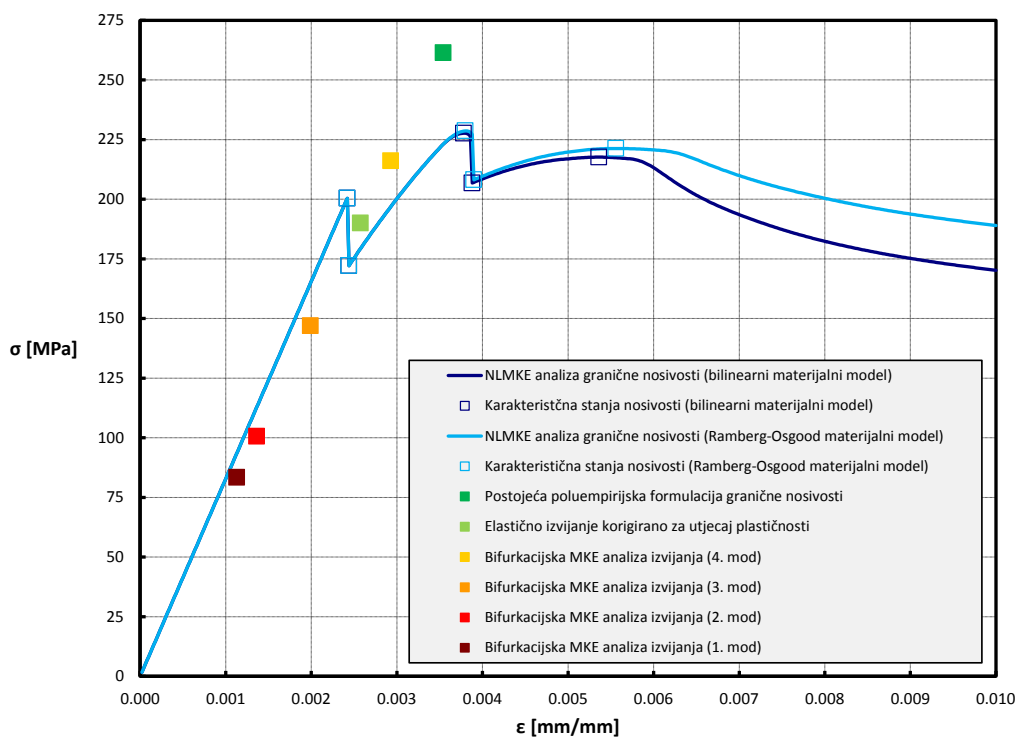




**Tablica 20. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR175-T650 (nastavak).****Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$$\begin{aligned}
 \sigma_{U3} &= 228.62 & \text{N/mm}^2 \\
 \varepsilon_{U3} &= 0.003800 & - \\
 F_{U3} &= 424584.94 & \text{N} \\
 u_{U3} &= 1.90 & \text{mm}
 \end{aligned}$$

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

Tablica 21. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR250-T050.

**Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500.00	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 200.00	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 0.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 100.00	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34.00	-
$\alpha$	= 2.50	-			

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10.00	mm
$N_b^e$	= 20	-	$b^e$	= 10.00	mm
$N^e$	= 1000 (Ukupni broj SS: 6426)		$\alpha^e$	= 1.00	-

**Elastična analiza izvijanja:**

$m$	= 2	-	$k$	= 4.20	-
$\sigma_E$	= 1.79	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 178.85	N
$\varepsilon_E$	= 0.000024	-	$u_E$	= 0.01	mm

**Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti:**

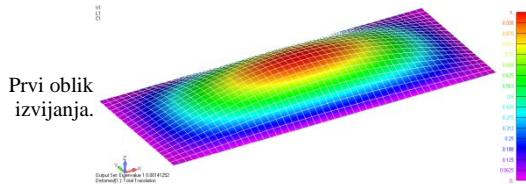
$E_s$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\nu$	= 0.33	-
$E_t$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\eta$	= 1.00	
$\sigma_{CR}$	= 1.79	N/mm <sup>2</sup>	$F_{CR}$	= 178.85	N
$\varepsilon_{CR}$	= 0.000024	-	$u_{CR}$	= 0.01	mm

**Granična nosivost prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji:**

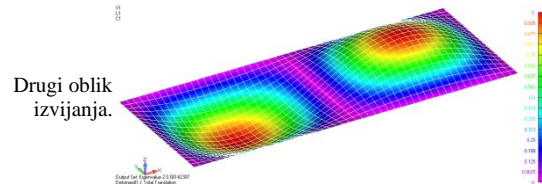
$C_1$	= 0.78	-	$C_2$	= 0.80	-
$\sigma_{U1}$	= 102.79	N/mm <sup>2</sup>	$F_{U1}$	= 10279.22	N
$\varepsilon_{U1}$	= 0.001393	-	$u_{U1}$	= 0.70	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.00141252$ ;  $m = 1$ )

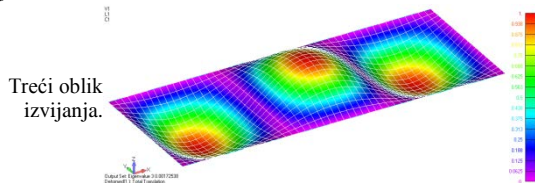
$\sigma_{E1}$	= 1.04	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000014	-
$F_{E1}$	= 104.21	N
$u_{E1}$	= 0.01	mm

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.00142307$ ;  $m = 2$ )

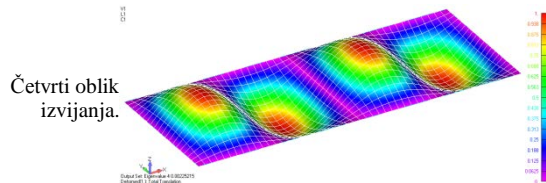
$\sigma_{E2}$	= 1.05	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000014	-
$F_{E2}$	= 104.99	N
$u_{E2}$	= 0.01	mm

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.00172538$ ;  $m = 3$ )

$\sigma_{E3}$	= 1.27	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000017	-
$F_{E3}$	= 127.29	N
$u_{E3}$	= 0.01	mm

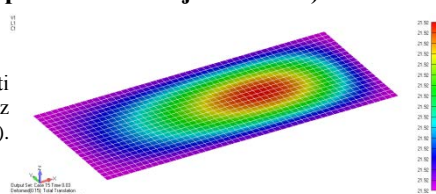
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.00225215$ ;  $m = 4$ )

$\sigma_{E4}$	= 1.66	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000023	-
$F_{E4}$	= 166.15	N
$u_{E4}$	= 0.01	mm

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 62.29	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.010000	-
$F_{U2}$	= 6229.42	N
$u_{U2}$	= 5.00	mm

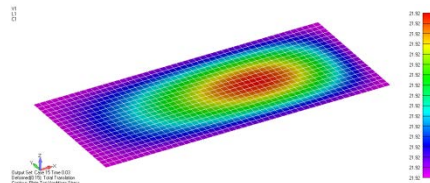
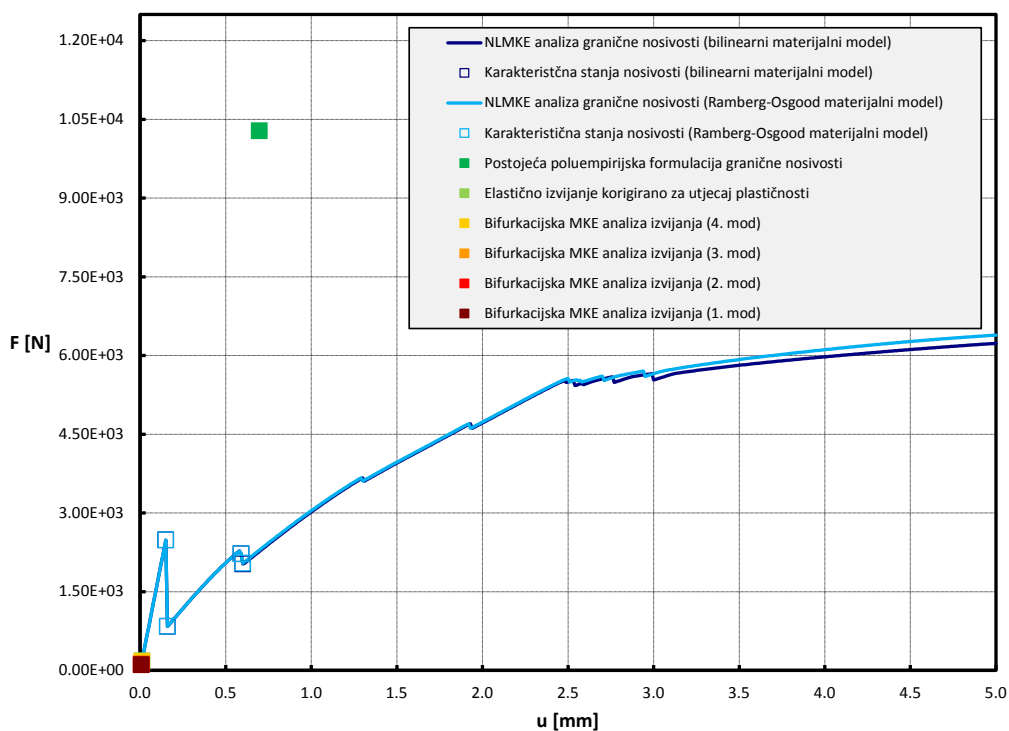
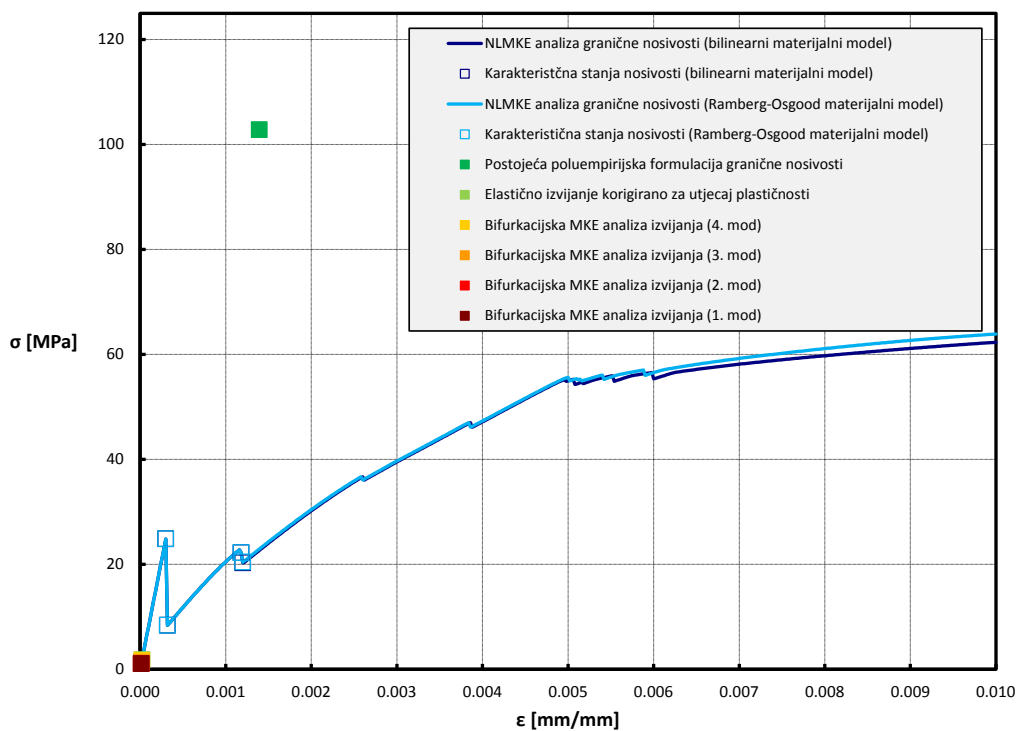
Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprežanja u N/mm<sup>2</sup>).



**Tablica 22. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR250-T050 (nastavak).****Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 24.84	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.010000	-
$F_{U3}$	= 6388.98	N
$u_{U3}$	= 5.00	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

**Tablica 23. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR250-T350.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500.00	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 200.00	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 3.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 700.00	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34.00	-
$\alpha$	= 2.50	-			

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10.00	mm
$N_b^e$	= 20	-	$b^e$	= 10.00	mm
$N^e$	= 1000 (Ukupni broj SS: 6426)		$\alpha^e$	= 1.00	-

**Elastična analiza izvijanja:**

$m$	= 2	-	$k$	= 4.20	-
$\sigma_E$	= 87.64	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 61344.66	N
$\varepsilon_E$	= 0.001188	-	$u_E$	= 0.59	mm

**Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti:**

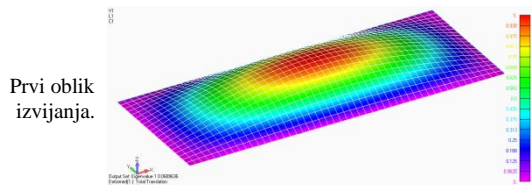
$E_s$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\nu$	= 0.33	-
$E_t$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\eta$	= 1.00	
$\sigma_{CR}$	= 87.64	N/mm <sup>2</sup>	$F_{CR}$	= 61344.66	N
$\varepsilon_{CR}$	= 0.001188	-	$u_{CR}$	= 0.59	mm

**Granična nosivost prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji:**

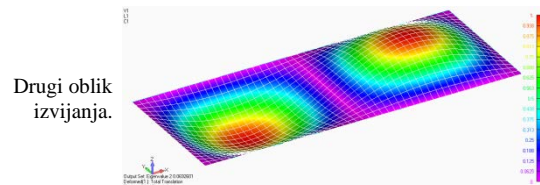
$C_1$	= 0.78	-	$C_2$	= 0.80	-
$\sigma_{U1}$	= 223.87	N/mm <sup>2</sup>	$F_{U1}$	= 156710.19	N
$\varepsilon_{U1}$	= 0.003035	-	$u_{U1}$	= 1.52	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.06896$ ;  $m = 1$ )

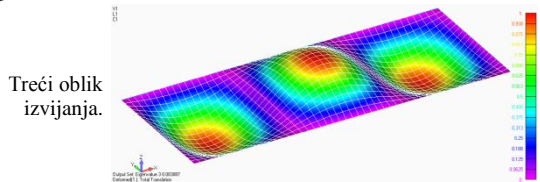
$\sigma_{E1}$	= 50.87	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.00069	-
$F_{E1}$	= 35612.15	N
$u_{E1}$	= 0.34	mm

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.06926$ ;  $m = 2$ )

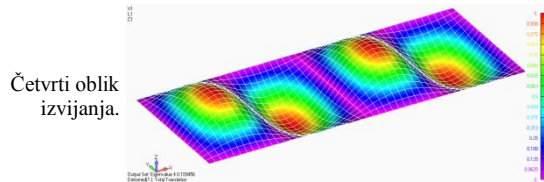
$\sigma_{E2}$	= 51.10	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000693	-
$F_{E2}$	= 35767.07	N
$u_{E2}$	= 0.35	mm

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.08389$ ;  $m = 3$ )

$\sigma_{E3}$	= 61.89	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.00084	-
$F_{E3}$	= 43322.26	N
$u_{E3}$	= 0.42	mm

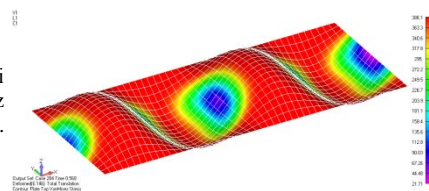
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.10946$ ;  $m = 4$ )

$\sigma_{E4}$	= 80.75	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.00109	-
$F_{E4}$	= 56527.05	N
$u_{E4}$	= 0.55	mm

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 185.55	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.005680	-
$F_{U2}$	= 129885.11	N
$u_{U2}$	= 2.84	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).



**Tablica 24. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR250-T350 (nastavak).****Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

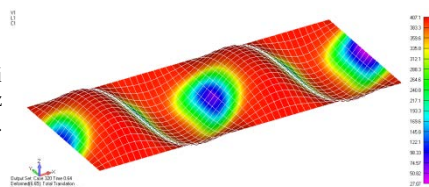
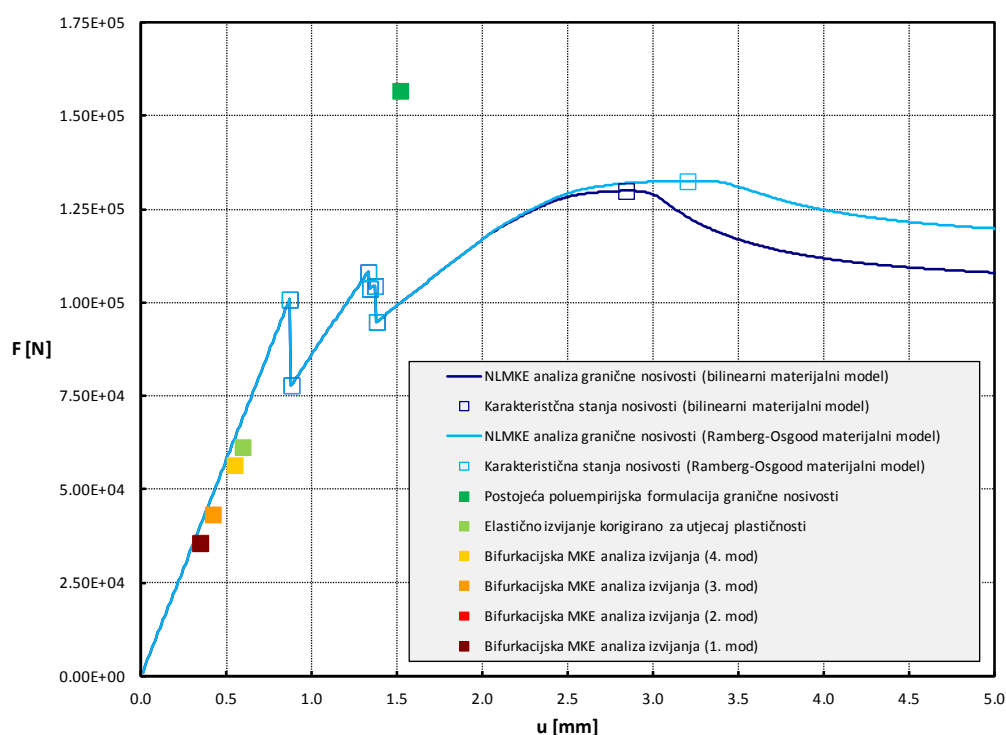
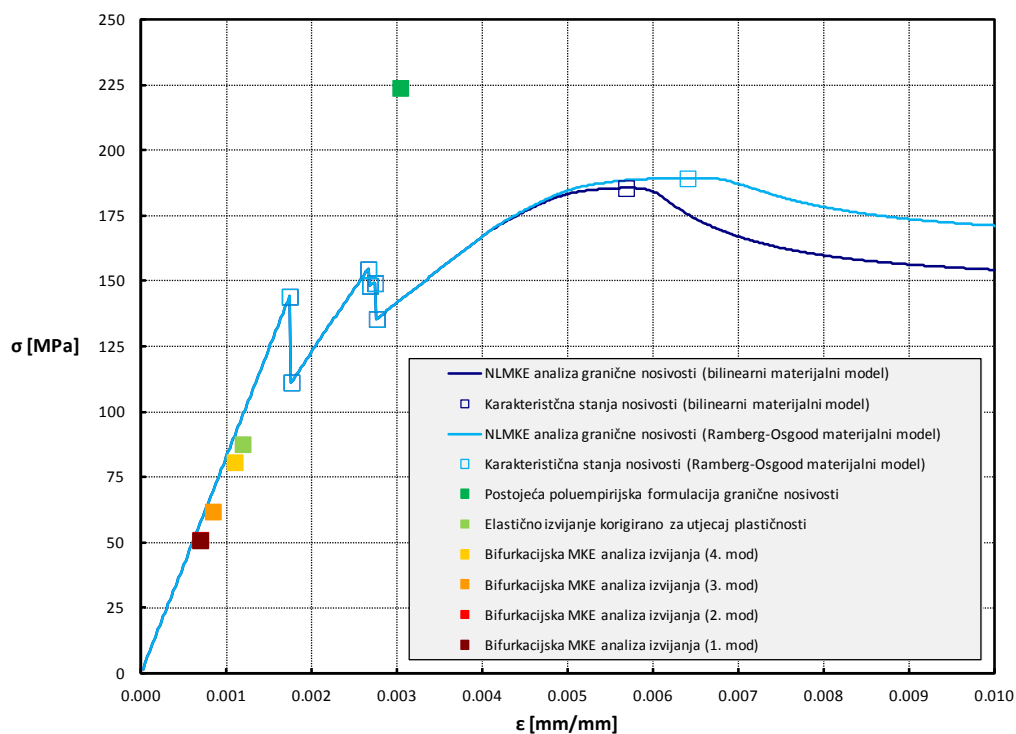
$$\sigma_{U3} = 189.29 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{U3} = 0.006400 \quad -$$

$$F_{U3} = 132500.86 \quad \text{N}$$

$$u_{U3} = 3.20 \quad \text{mm}$$

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

**Tablica 25. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR325-T200.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500.00	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 153.846	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 2.00	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 307.69	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34.00	-
$\alpha$	= 3.25	-			

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10.00	mm
$N_b^e$	= 16	-	$b^e$	= 9.615	mm
$N^e$	= 800 (Ukupni broj SS: 5202)		$\alpha^e$	= 1.04	-

**Elastična analiza izvijanja:**

$m$	= 2	-	$k$	= 5.02	-
$\sigma_E$	= 57.76	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 17772.33	N
$\varepsilon_E$	= 0.000783	-	$u_E$	= 0.39	mm

**Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti:**

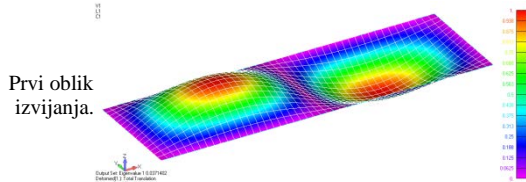
$E_s$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\nu$	= 0.33	-
$E_t$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\eta$	= 1.00	
$\sigma_{CR}$	= 57.76	N/mm <sup>2</sup>	$F_{CR}$	= 17772.33	N
$\varepsilon_{CR}$	= 0.000783	-	$u_{CR}$	= 0.39	mm

**Granična nosivost prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji:**

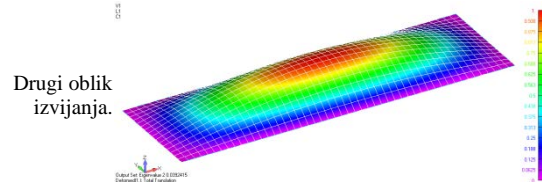
$C_1$	= 0.78	-	$C_2$	= 0.80	-
$\sigma_{U1}$	= 205.96	N/mm <sup>2</sup>	$F_{U1}$	= 63373.14	N
$\varepsilon_{U1}$	= 0.002792	-	$u_{U1}$	= 1.40	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.0371402$ ;  $m = 2$ )

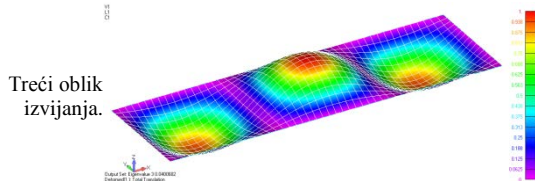
$\sigma_{E1}$	= 27.40	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000371	-
$F_{E1}$	= 8430.69	N
$u_{E1}$	= 0.19	mm

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.0392415$ ;  $m = 1$ )

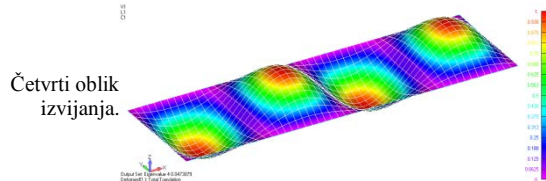
$\sigma_{E2}$	= 28.95	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000392	-
$F_{E2}$	= 8907.68	N
$u_{E2}$	= 0.20	mm

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.0400682$ ;  $m = 3$ )

$\sigma_{E3}$	= 29.56	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000401	-
$F_{E3}$	= 9095.34	N
$u_{E3}$	= 0.20	mm

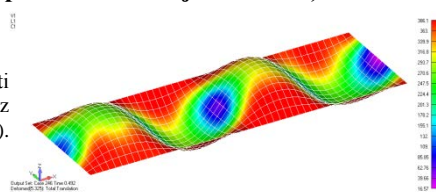
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.0473079$ ;  $m = 4$ )

$\sigma_{E4}$	= 34.90	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000473	-
$F_{E4}$	= 10738.73	N
$u_{E4}$	= 0.24	mm

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 177.87	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.004920	-
$F_{U2}$	= 54729.21	N
$u_{U2}$	= 2.46	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprežanja u N/mm<sup>2</sup>).

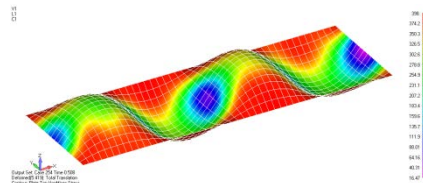
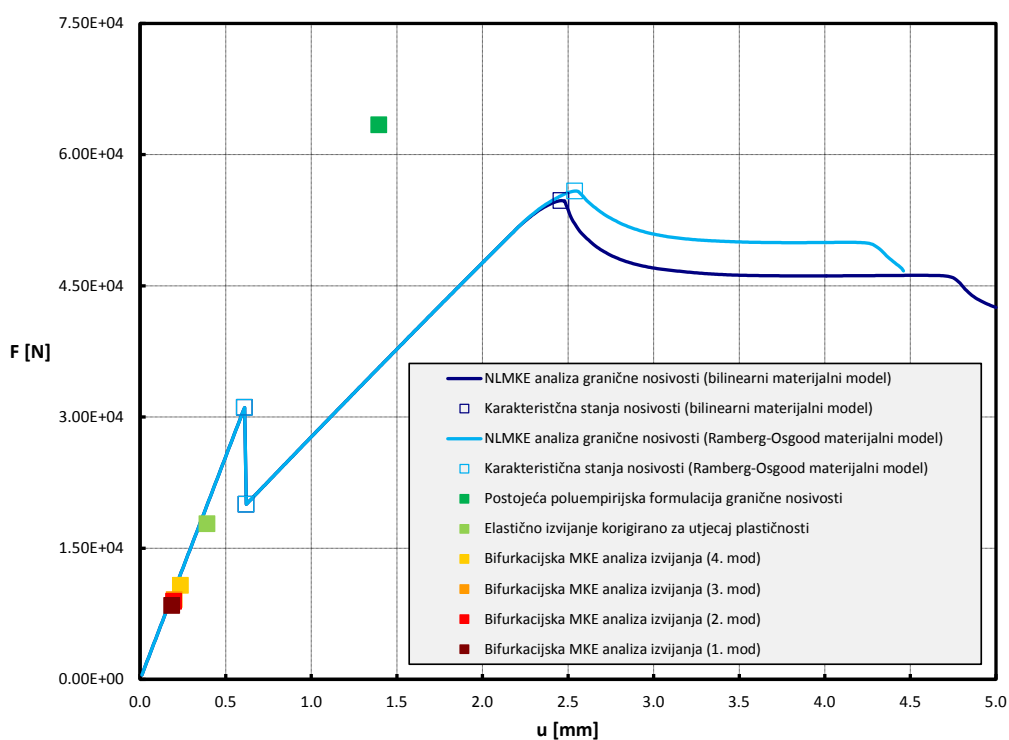
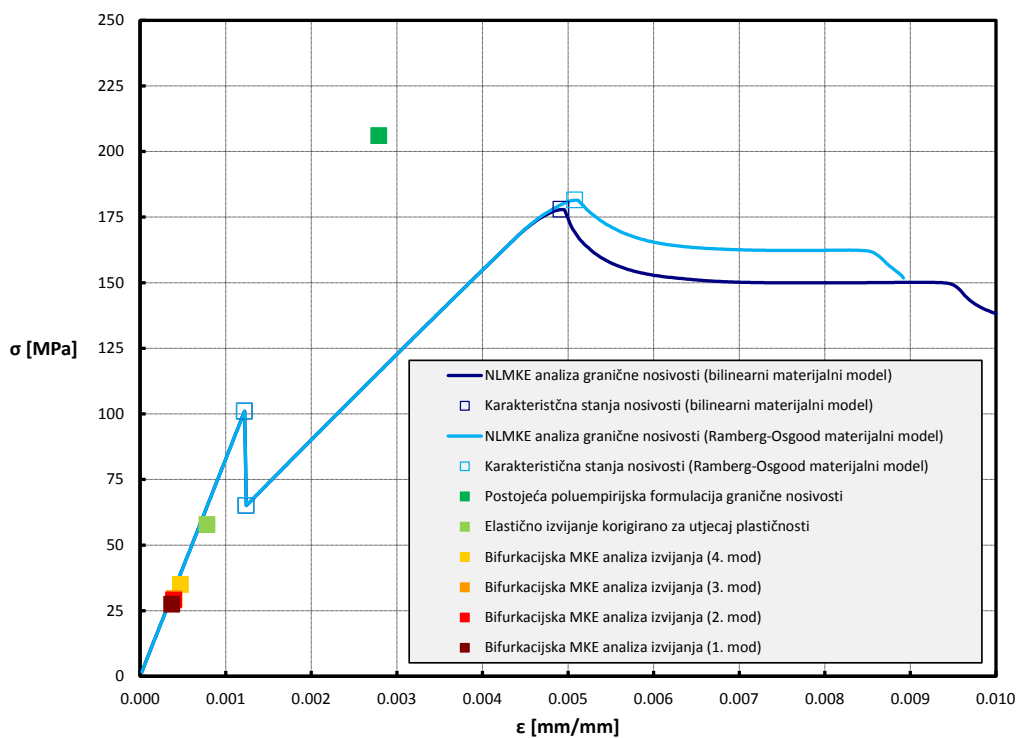




**Tablica 26. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR325-T200 (nastavak).****Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$$\begin{aligned}
 \sigma_{U3} &= 181.43 & \text{N/mm}^2 \\
 \varepsilon_{U3} &= 0.005080 & - \\
 F_{U3} &= 55823.27 & \text{N} \\
 u_{U3} &= 2.54 & \text{mm}
 \end{aligned}$$

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

Tablica 27. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR325-T500.

**Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500.00	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 153.85	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 5.00	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 769.23	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34.00	-
$\alpha$	= 3.25	-			

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10.00	mm
$N_b^e$	= 16	-	$b^e$	= 9.615	mm
$N^e$	= 800 (Ukupni broj SS: 5202)		$\alpha^e$	= 1.04	-

**Elastična analiza izvijanja:**

$m$	= 2	-	$k$	= 5.02	-
$\sigma_E$	= 361	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 277692.58	N
$\varepsilon_E$	= 0.005097	-	$u_E$	= 2.55	mm

**Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti:**

$E_s$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\nu$	= 0.34	-
$E_t$	= 30579.30	N/mm <sup>2</sup>	$\eta$	= 0.8480	
$\sigma_{CR}$	= 306.13	N/mm <sup>2</sup>	$F_{CR}$	= 235482.18	N
$\varepsilon_{CR}$	= 0.004150	-	$u_{CR}$	= 2.08	mm

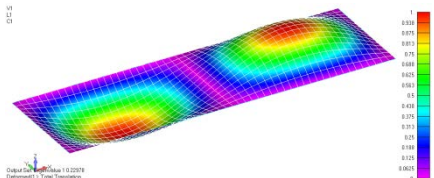
**Granična nosivost prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji:**

$C_1$	= 0.78	-	$C_2$	= 0.80	-
$\sigma_{U1}$	= 306.13	N/mm <sup>2</sup>	$F_{U1}$	= 235482.18	N
$\varepsilon_{U1}$	= 0.004150	-	$u_{U1}$	= 2.08	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.22978$ ;  $m = 2$ )

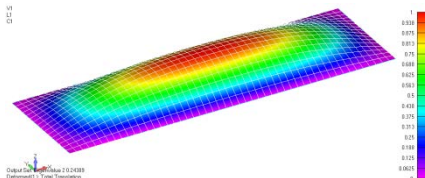
$\sigma_{E1}$	= 169.52	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.002298	-
$F_{E1}$	= 130398.11	N
$u_{E1}$	= 1.15	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.24389$ ;  $m = 1$ )

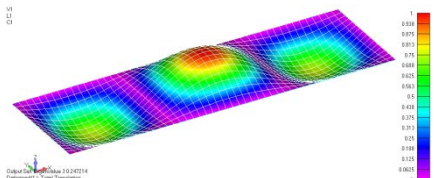
$\sigma_{E2}$	= 179.93	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.002439	-
$F_{E2}$	= 138405.41	N
$u_{E2}$	= 1.22	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.247214$ ;  $m = 3$ )

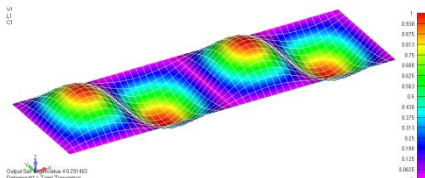
$\sigma_{E3}$	= 182.38	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.002472	-
$F_{E3}$	= 140291.75	N
$u_{E3}$	= 1.24	mm

Treći oblik izvijanja.

4. način izvijanja ( $\lambda = 0.291403$ ;  $m = 4$ )

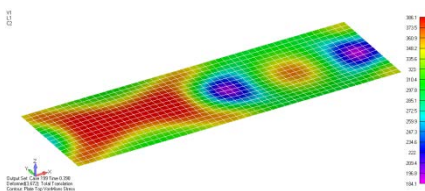
$\sigma_{E4}$	= 214.98	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.002914	-
$F_{E4}$	= 165368.62	N
$u_{E4}$	= 1.46	mm

Četvrti oblik izvijanja.

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 327.85	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.003960	-
$F_{U2}$	= 252189.96	N
$u_{U2}$	= 1.98	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

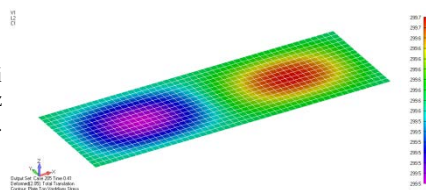
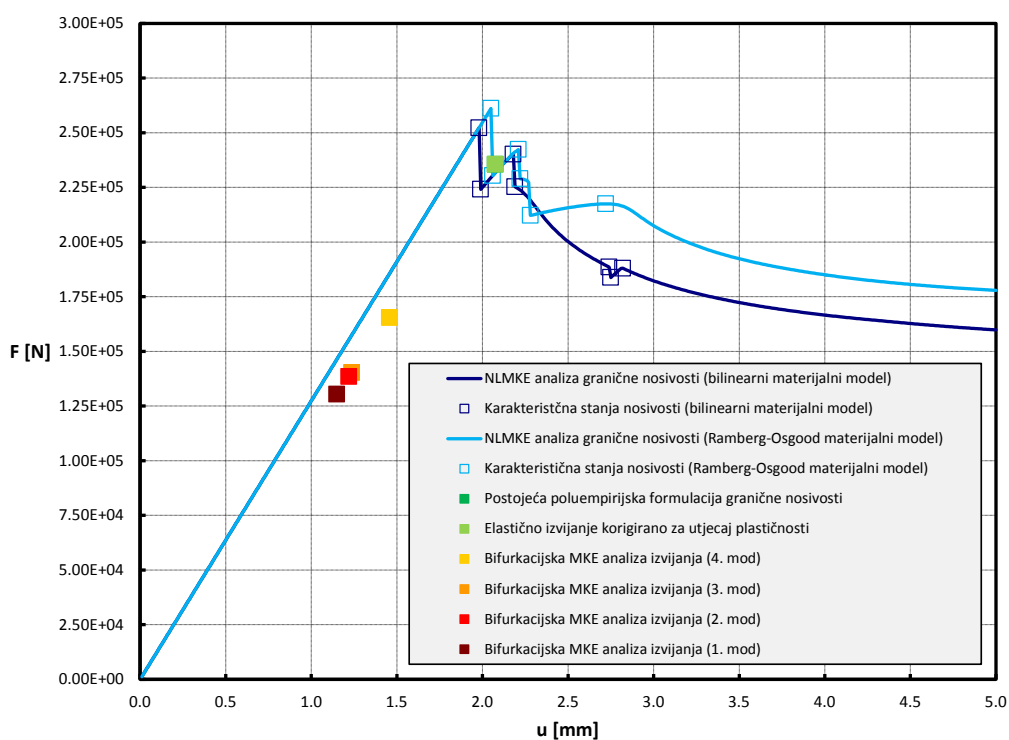
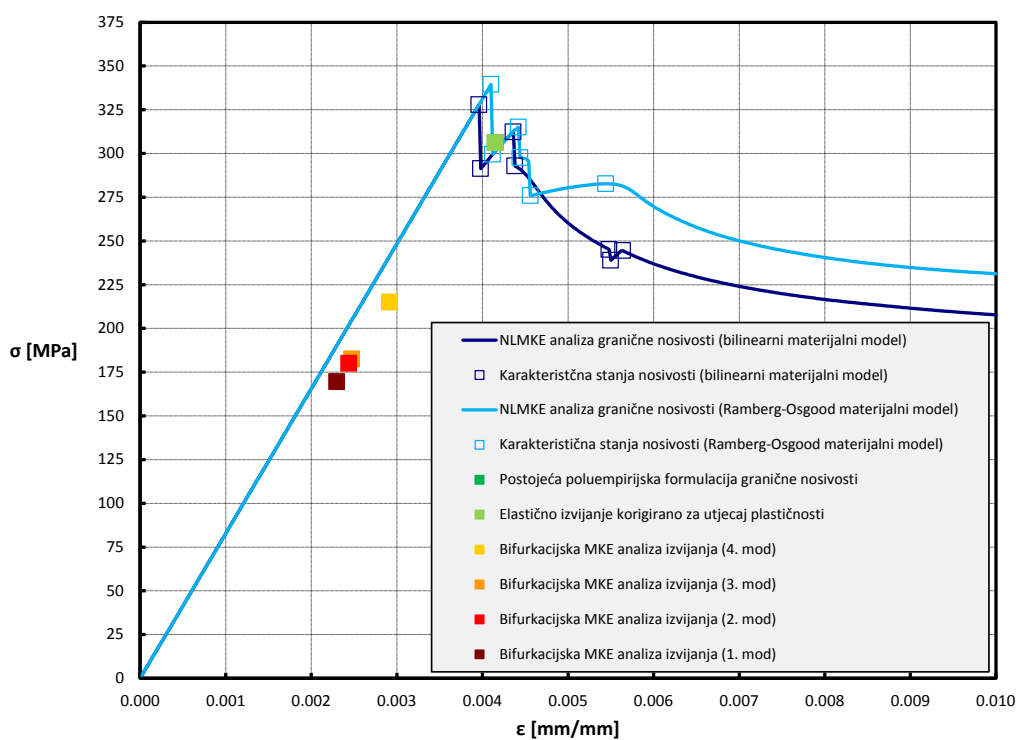




**Tablica 28. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR325-T500 (nastavak).****Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	=339.44	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	=0.004100	-
$F_{U3}$	=261105.77	N
$u_{U3}$	= 2.05	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

Tablica 29. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR400-T050.

**Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500.00	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 125	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 0.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 62.5	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34.00	-
$\alpha$	= 4.00	-			

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10.00	mm
$N_b^e$	= 12	-	$b^e$	= 10.417	mm
$N^e$	= 600 (Ukupni broj SS: 3978)		$\alpha^e$	= 1.04	-

**Elastična analiza izvijanja:**

$m$	= 3	-	$k$	= 4.34	-
$\sigma_E$	= 4.73	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 295.54	N
$\varepsilon_E$	= 0.000064	-	$u_E$	= 0.03	mm

**Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti:**

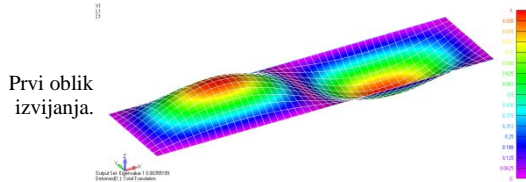
$E_s$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\nu$	= 0.33	-
$E_t$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\eta$	= 1.00	
$\sigma_{CR}$	= 4.73	N/mm <sup>2</sup>	$F_{CR}$	= 295.54	N
$\varepsilon_{CR}$	= 0.000064	-	$u_{CR}$	= 0.03	mm

**Granična nosivost prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji:**

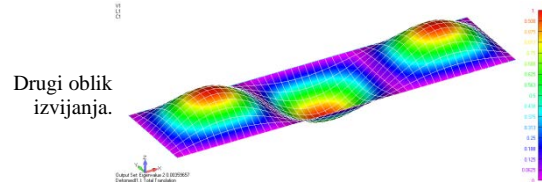
$C_1$	= 0.78	-	$C_2$	= 0.80	-
$\sigma_{U1}$	= 124.86	N/mm <sup>2</sup>	$F_{U1}$	= 7803.51	N
$\varepsilon_{U1}$	= 0.001692	-	$u_{U1}$	= 0.85	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.00355199$ ;  $m = 2$ )

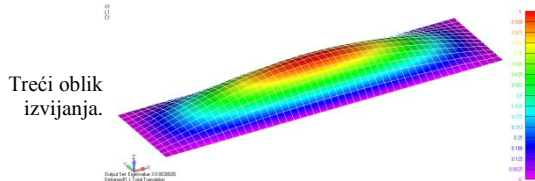
$\sigma_{E1}$	= 2.62	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000036	-
$F_{E1}$	= 163.78	N
$u_{E1}$	= 0.02	mm

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.00359657$ ;  $m = 3$ )

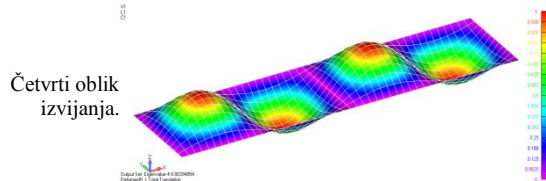
$\sigma_{E2}$	= 2.65	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000036	-
$F_{E2}$	= 165.83	N
$u_{E2}$	= 0.02	mm

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.0038026$ ;  $m = 1$ )

$\sigma_{E3}$	= 2.81	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000038	-
$F_{E3}$	= 175.33	N
$u_{E3}$	= 0.02	mm

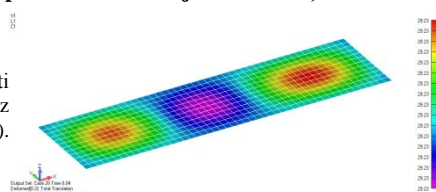
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.00394854$ ;  $m = 4$ )

$\sigma_{E4}$	= 2.91	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000039	-
$F_{E4}$	= 182.06	N
$u_{E4}$	= 0.02	mm

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 94.76	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.010000	-
$F_{U2}$	= 5922.73	N
$u_{U2}$	= 5.00	mm

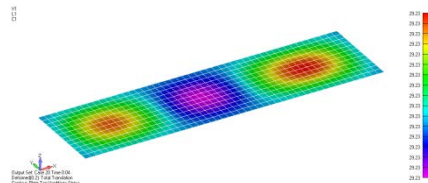
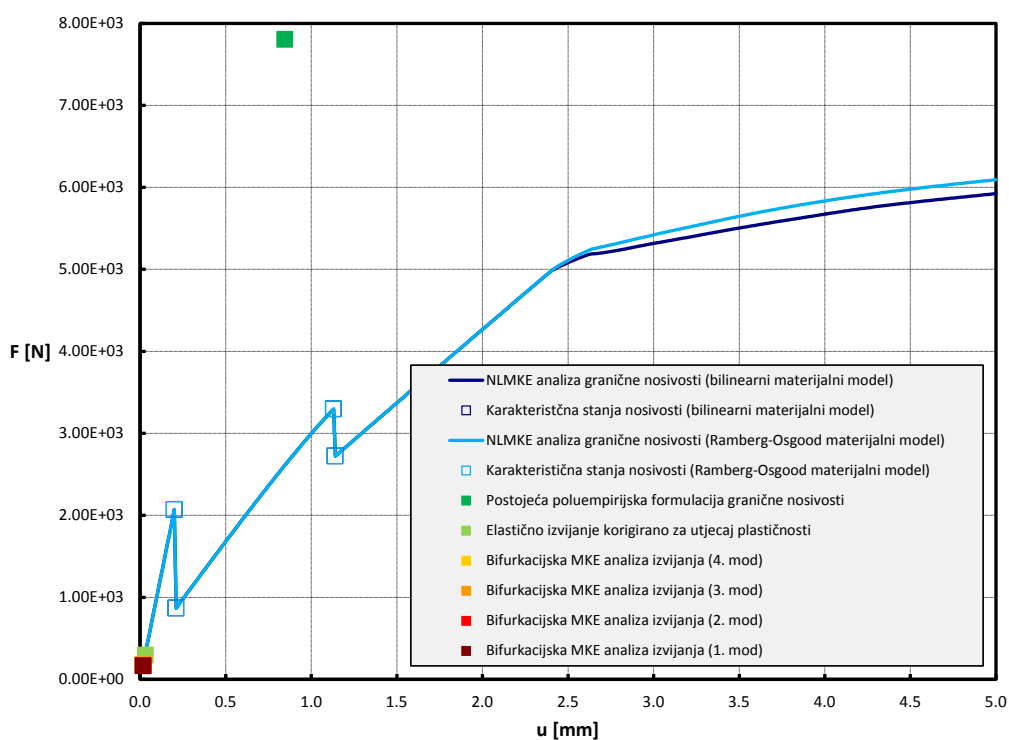
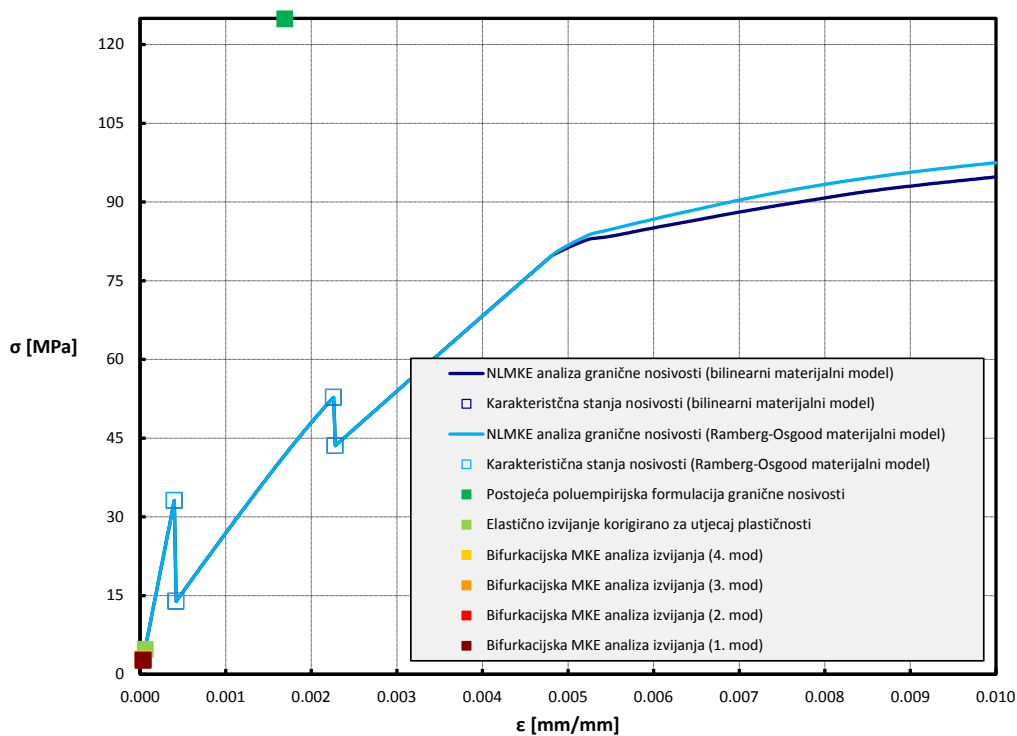
Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprežanja u N/mm<sup>2</sup>).



**Tablica 30. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR400-T050 (nastavak).****Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$$\begin{aligned}\sigma_{U3} &= 33.12 & \text{N/mm}^2 \\ \varepsilon_{U3} &= 0.010000 & - \\ F_{U3} &= 6092.78 & \text{N} \\ u_{U3} &= 5.00 & \text{mm}\end{aligned}$$

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

Tablica 31. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR400-T350.

**Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500.00	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 125	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 3.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 437.5	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34.00	-
$\alpha$	= 4.00	-			

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10.00	mm
$N_b^e$	= 12	-	$b^e$	= 10.417	mm
$N^e$	= 600 (Ukupni broj SS: 3978)		$\alpha^e$	= 1.04	-

**Elastična analiza izvijanja:**

$m$	= 3	-	$k$	= 4.34	-
$\sigma_E$	= 231.70	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 101369.33	N
$\varepsilon_E$	= 0.003141	-	$u_E$	= 1.57	mm

**Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti:**

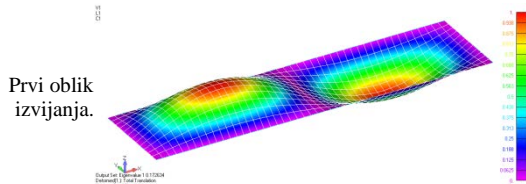
$E_s$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>	$\nu$	= 0.33	-
$E_t$	= 73773.87	N/mm <sup>2</sup>	$\eta$	= 1.00	
$\sigma_{CR}$	= 231.70	N/mm <sup>2</sup>	$F_{CR}$	= 101369.31	N
$\varepsilon_{CR}$	= 0.003141	-	$u_{CR}$	= 1.57	mm

**Granična nosivost prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji:**

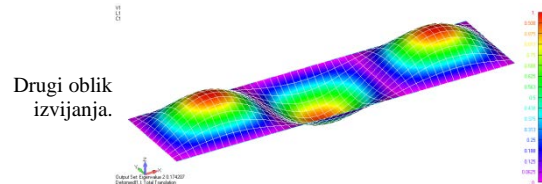
$C_1$	= 0.78	-	$C_2$	= 0.80	-
$\sigma_{U1}$	= 271.92	N/mm <sup>2</sup>	$F_{U1}$	= 118967.19	N
$\varepsilon_{U1}$	= 0.003686	-	$u_{U1}$	= 1.84	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.172634$ ;  $m = 2$ )

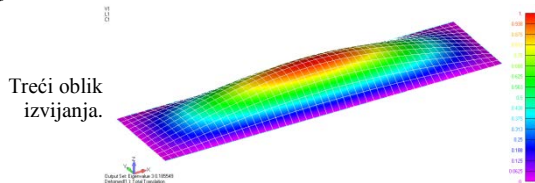
$\sigma_{E1}$	= 127.36	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.001726	-
$F_{E1}$	= 55719.51	N
$u_{E1}$	= 0.86	mm

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.174207$ ;  $m = 3$ )

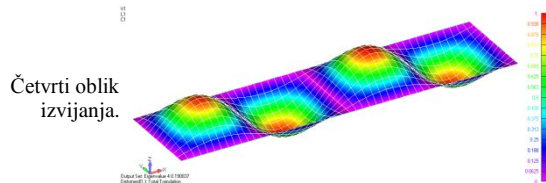
$\sigma_{E2}$	= 128.52	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.001742	-
$F_{E2}$	= 56227.21	N
$u_{E2}$	= 0.87	mm

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.185549$ ;  $m = 1$ )

$\sigma_{E3}$	= 136.89	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.001855	-
$F_{E3}$	= 59887.96	N
$u_{E3}$	= 0.93	mm

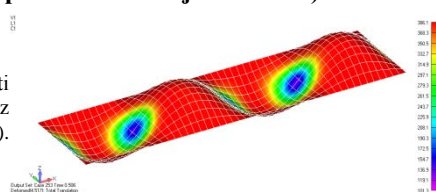
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.190837$ ;  $m = 4$ )

$\sigma_{E4}$	= 140.79	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.001908	-
$F_{E4}$	= 61594.72	N
$u_{E4}$	= 0.95	mm

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 271.83	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.005060	-
$F_{U2}$	= 118926.66	N
$u_{U2}$	= 2.53	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprežanja u N/mm<sup>2</sup>).



**Tablica 32. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR400-T350 (nastavak).****Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

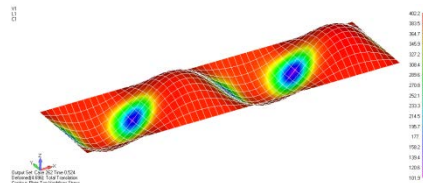
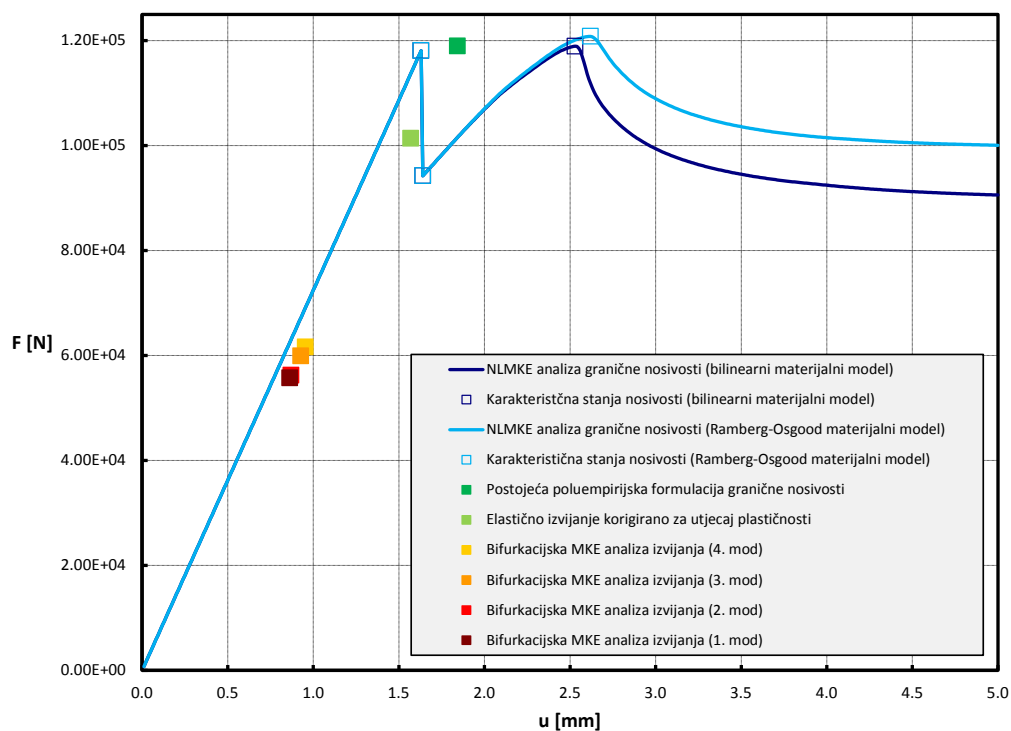
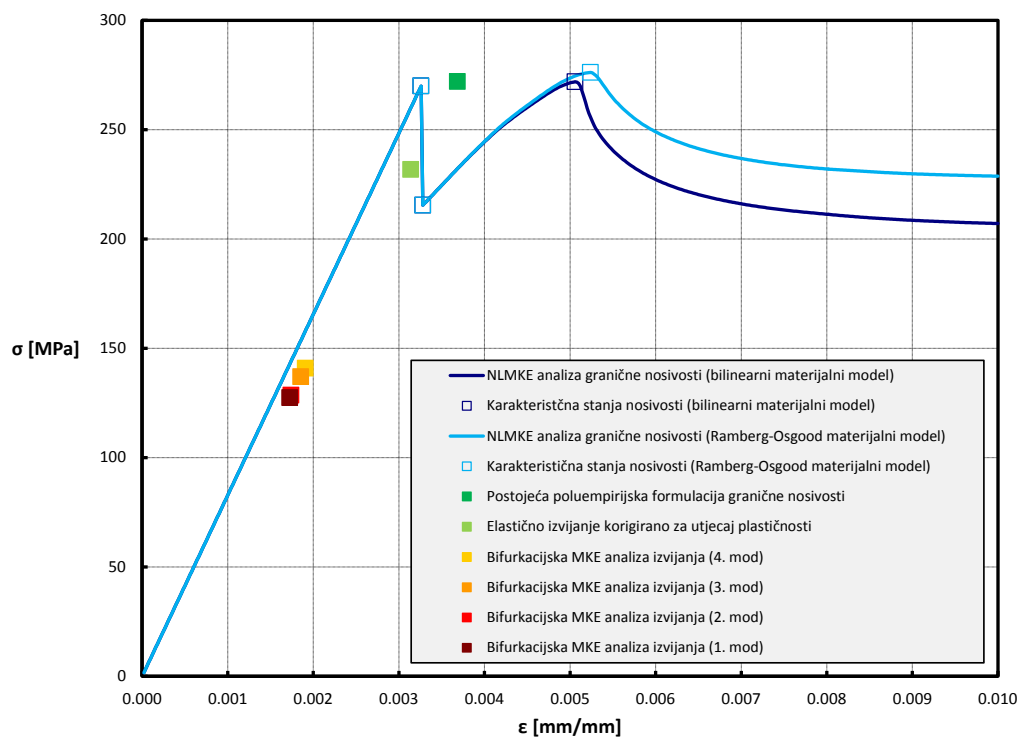
$$\sigma_{U3} = 276.11 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{U3} = 0.005240 \quad -$$

$$F_{U3} = 120797.58 \quad \text{N}$$

$$u_{U3} = 2.62 \quad \text{mm}$$

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

Tablica 33. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR400-T650.

**Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500.00	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 125	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 6.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 812.5	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34.00	-
$\alpha$	= 4.00	-			

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10.00	mm
$N_b^e$	= 12	-	$b^e$	= 10.417	mm
$N^e$	= 600 (Ukupni broj SS: 3978)		$\alpha^e$	= 1.04	-

**Elastična analiza izvijanja:**

$m$	= 3	-	$k$	= 4.34	-
$\sigma_E$	= 799.13	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 649295.66	N
$\varepsilon_E$	=	-	$u_E$	= 55064878220.94	mm
	110129756.4419				

**Elastično izvijanje korigirano za utjecaj plastičnosti:**

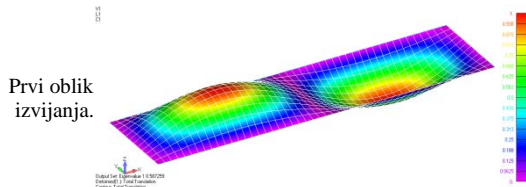
$E_s$	= 0.00	N/mm <sup>2</sup>	$\nu$	= 0.5	-
$E_t$	= 0.00	N/mm <sup>2</sup>	$\eta$	= 0.00	-
$\sigma_{CR}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>	$F_{CR}$	= 313714.38	N
$\varepsilon_{CR}$	= 0.007234	-	$u_{CR}$	= 3.62	mm

**Granična nosivost prema postojećoj poluempirijskoj formulaciji:**

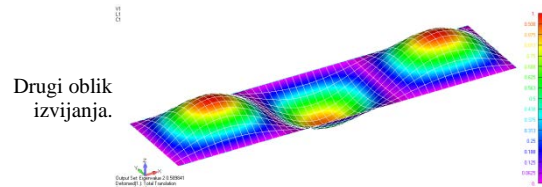
$C_1$	= 0.78	-	$C_2$	= 0.80	-
$\sigma_{U1}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>	$F_{U1}$	= 313714.38	N
$\varepsilon_{U1}$	= 0.007234	-	$u_{U1}$	= 3.62	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.172634$ ;  $m = 2$ )

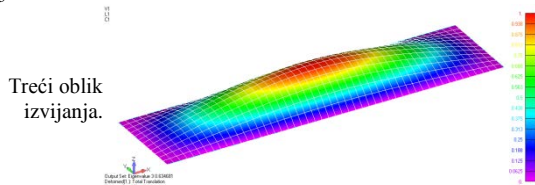
$\sigma_{E1}$	= 433.24	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.005873	-
$F_{E1}$	= 352010.74	N
$u_{E1}$	= 2.94	mm

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.174207$ ;  $m = 3$ )

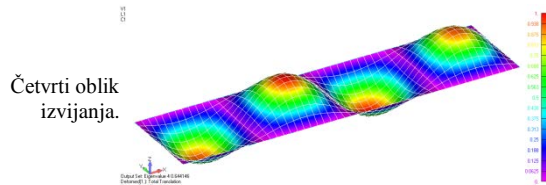
$\sigma_{E2}$	= 435.15	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.005898	-
$F_{E2}$	= 353558.42	N
$u_{E2}$	= 2.95	mm

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.185549$ ;  $m = 1$ )

$\sigma_{E3}$	= 468.23	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.006347	-
$F_{E3}$	= 380436.11	N
$u_{E3}$	= 3.17	mm

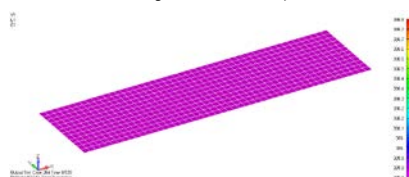
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.190837$ ;  $m = 4$ )

$\sigma_{E4}$	= 475.21	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.006441	-
$F_{E4}$	= 386109.55	N
$u_{E4}$	= 3.22	mm

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 441.98	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.007160	-
$F_{U2}$	= 359107.23	N
$u_{U2}$	= 3.58	mm

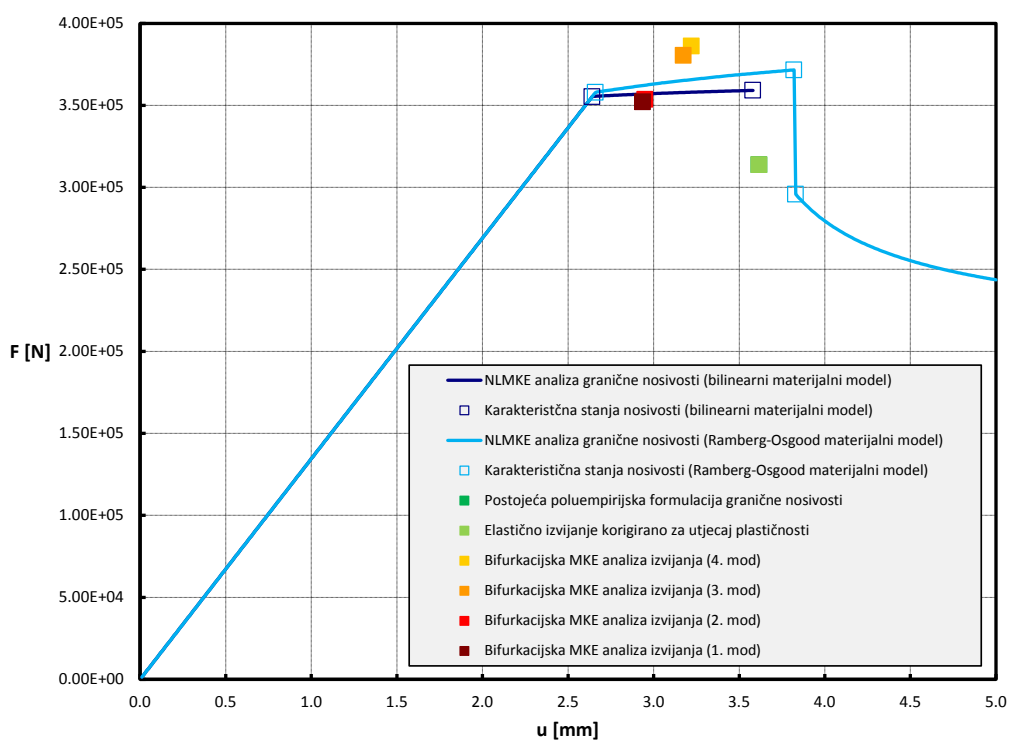
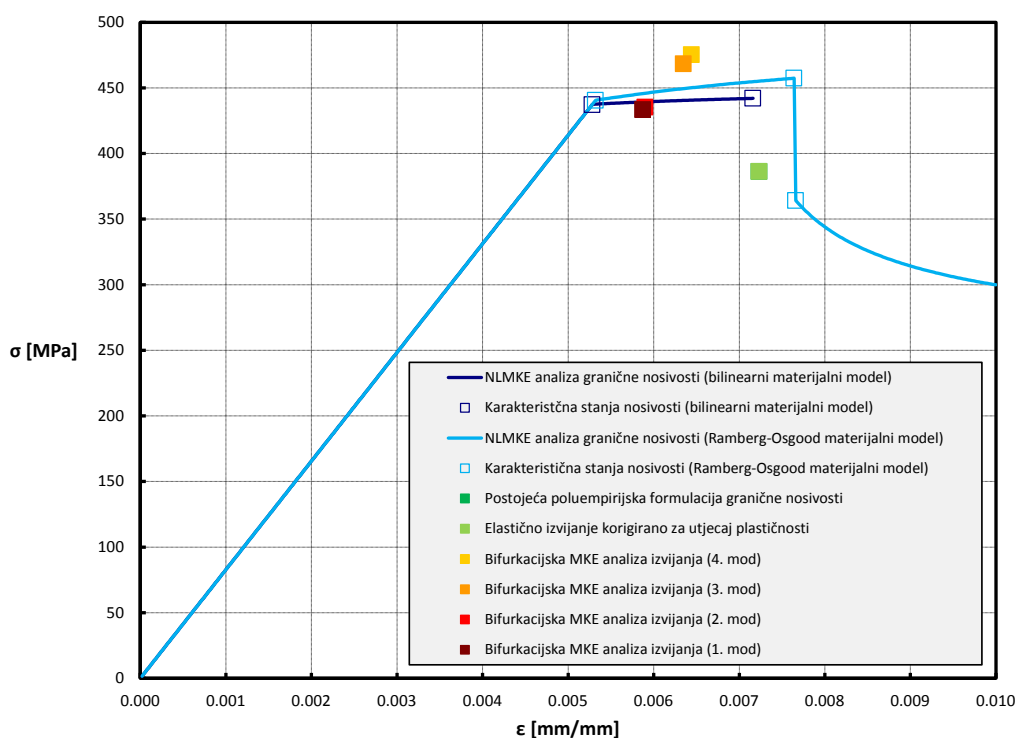
Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).



**Tablica 34. Karakteristike i rezultati za panel oznake FP-AR400-T650 (nastavak).****Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$$\begin{aligned}
 \sigma_{U3} &= 457.36 & \text{N/mm}^2 \\
 \varepsilon_{U3} &= 0.007640 & - \\
 F_{U3} &= 371603.84 & \text{N} \\
 u_{U3} &= 3.82 & \text{mm}
 \end{aligned}$$

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

## **PRILOG II**



**Tablica 35. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR100-T050-R2125.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 500	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 0.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 250	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 1.00	-	$r$	= 2125	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 50	-	$b^e$	= 10	mm
$N^e$	= 2500 (Ukupni broj SS: 15606)		$\alpha^e$	= 1.00	-

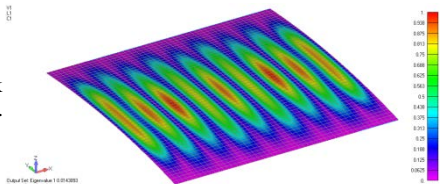
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 1.80	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 450.00	N
$\varepsilon_E$	= 0.000024	-	$u_E$	= 0.01	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.0143893$  ;  $m = 9$  )

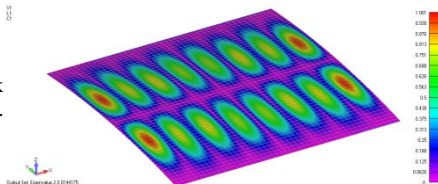
$\sigma_{E1}$	= 10.62	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000144	-
$F_{E1}$	= 2653.89	N
$u_{E1}$	= 0.07	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.0144175$  ;  $m = 16$  )

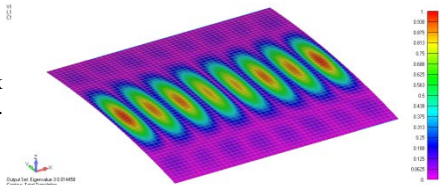
$\sigma_{E2}$	= 10.64	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000144	-
$F_{E2}$	= 2659.09	N
$u_{E2}$	= 0.07	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.014458$  ;  $m = 8$  )

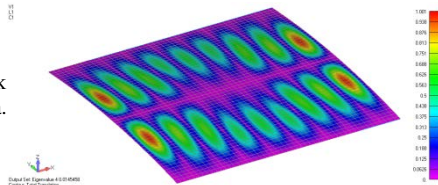
$\sigma_{E3}$	= 10.67	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000145	-
$F_{E3}$	= 2666.56	N
$u_{E3}$	= 0.07	mm

Treći oblik izvijanja.

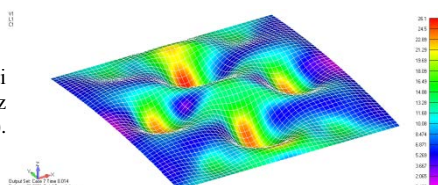
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.0145458$  ;  $m = 18$  )

$\sigma_{E4}$	= 10.73	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000145	-
$F_{E4}$	= 2682.75	N
$u_{E4}$	= 0.07	mm

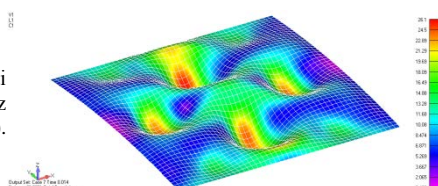
Četvrti oblik izvijanja.

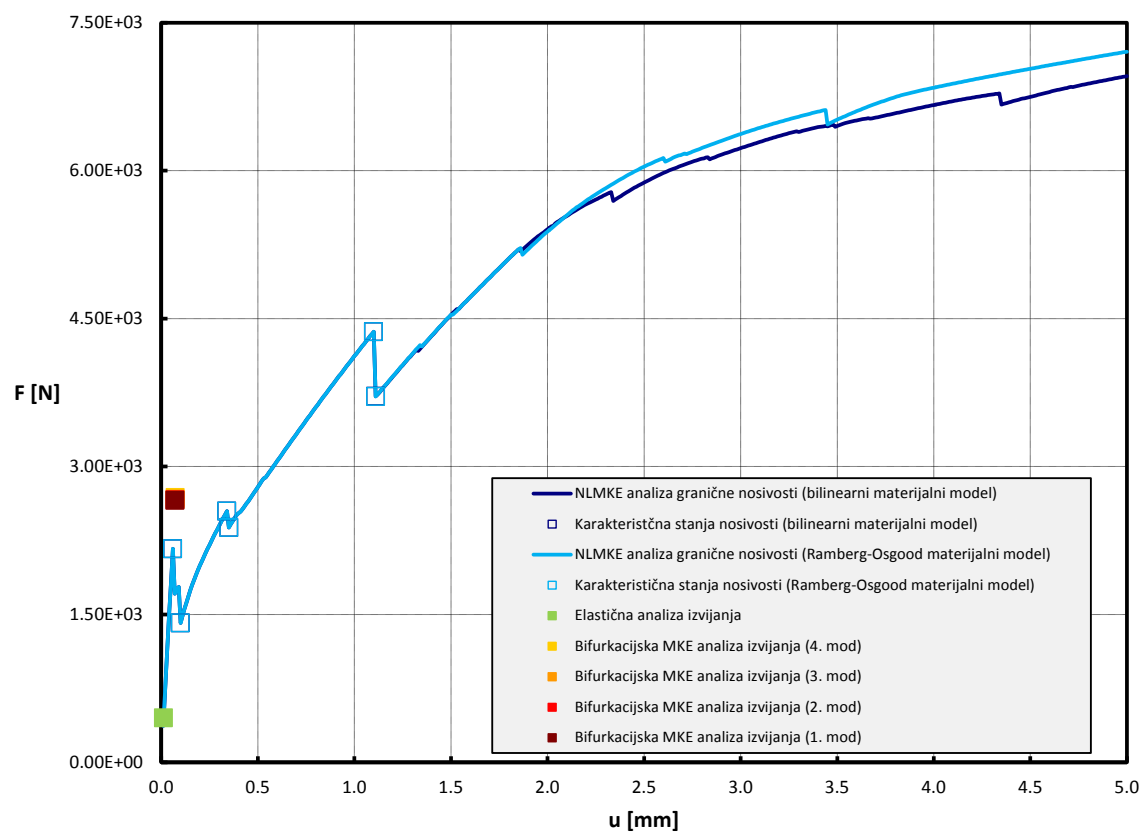
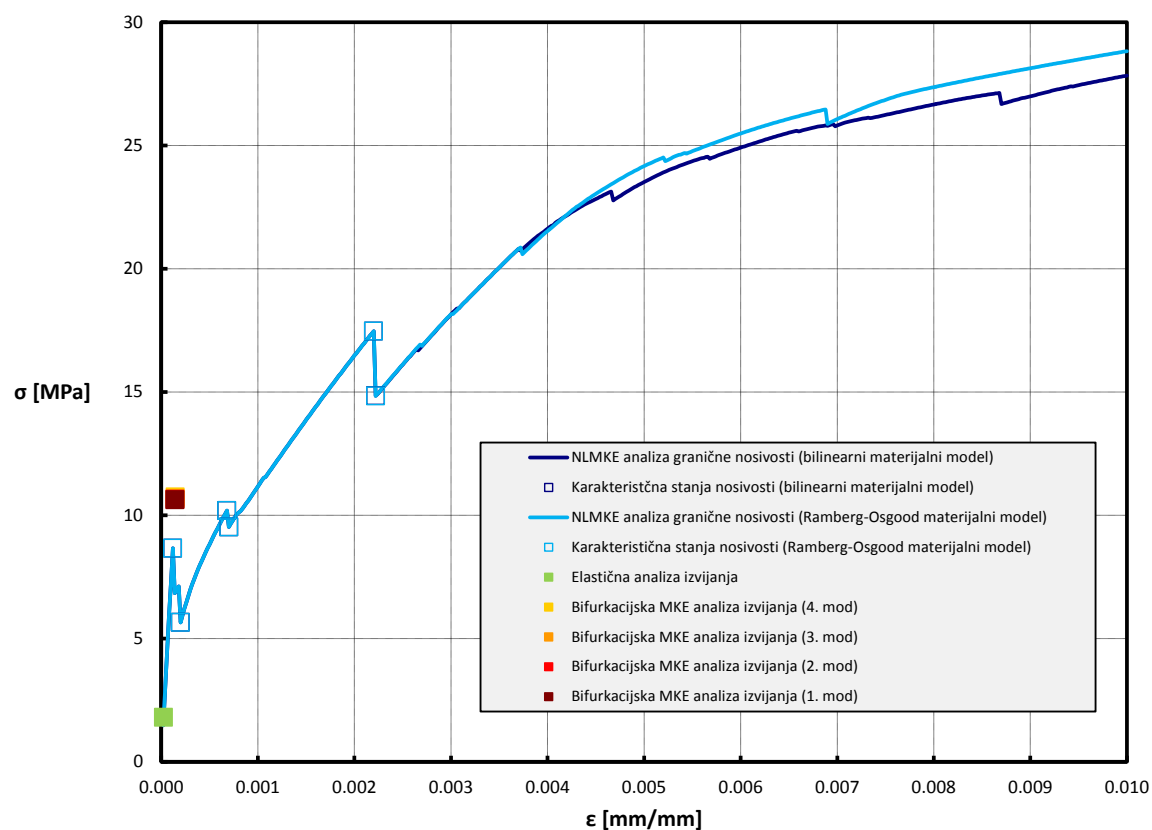
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 27.83	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.010000	-
$F_{U2}$	= 6958.14	N
$u_{U2}$	= 5.00	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprežanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 8.6599	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.010000	-
$F_{U3}$	= 7205.53	N
$u_{U3}$	= 5.00	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprežanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 36. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR100-T050-R2125 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\epsilon$  i F-u dijagrama:

**Tablica 37. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR100-T050-R2875.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 500	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 0.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 250	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 1.00	-	$r$	= 2875	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 50	-	$b^e$	= 10	mm
$N^e$	= 2500 (Ukupni broj SS: 15606)		$\alpha^e$	= 1.00	-

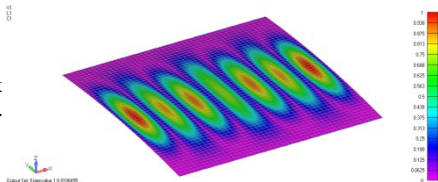
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 1.60	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 400.00	N
$\varepsilon_E$	= 0.000022	-	$u_E$	= 0.01	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.0106495$  ;  $m = 7$ )

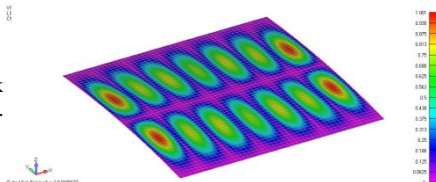
$\sigma_{E1}$	= 7.86	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000106	-
$F_{E1}$	= 1964.14	N
$u_{E1}$	= 0.05	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.0106677$  ;  $m = 14$ )

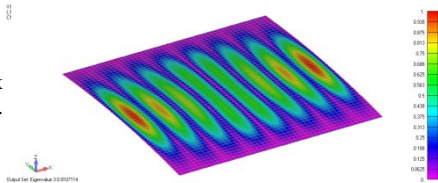
$\sigma_{E2}$	= 7.87	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000107	-
$F_{E2}$	= 1967.50	N
$u_{E2}$	= 0.05	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.0107114$  ;  $m = 8$ )

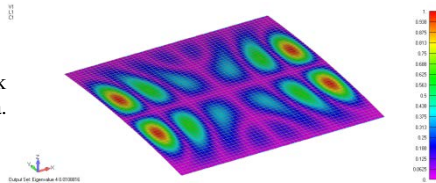
$\sigma_{E3}$	= 7.90	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000107	-
$F_{E3}$	= 1975.55	N
$u_{E3}$	= 0.05	mm

Treći oblik izvijanja.

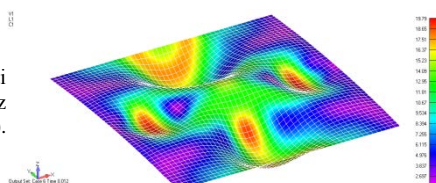
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.0108816$  ;  $m = 12$ )

$\sigma_{E4}$	= 8.03	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000109	-
$F_{E4}$	= 2006.95	N
$u_{E4}$	= 0.05	mm

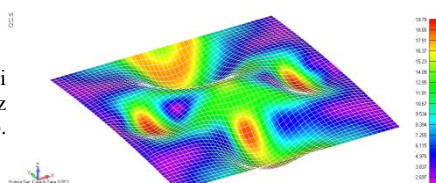
Četvrti oblik izvijanja.

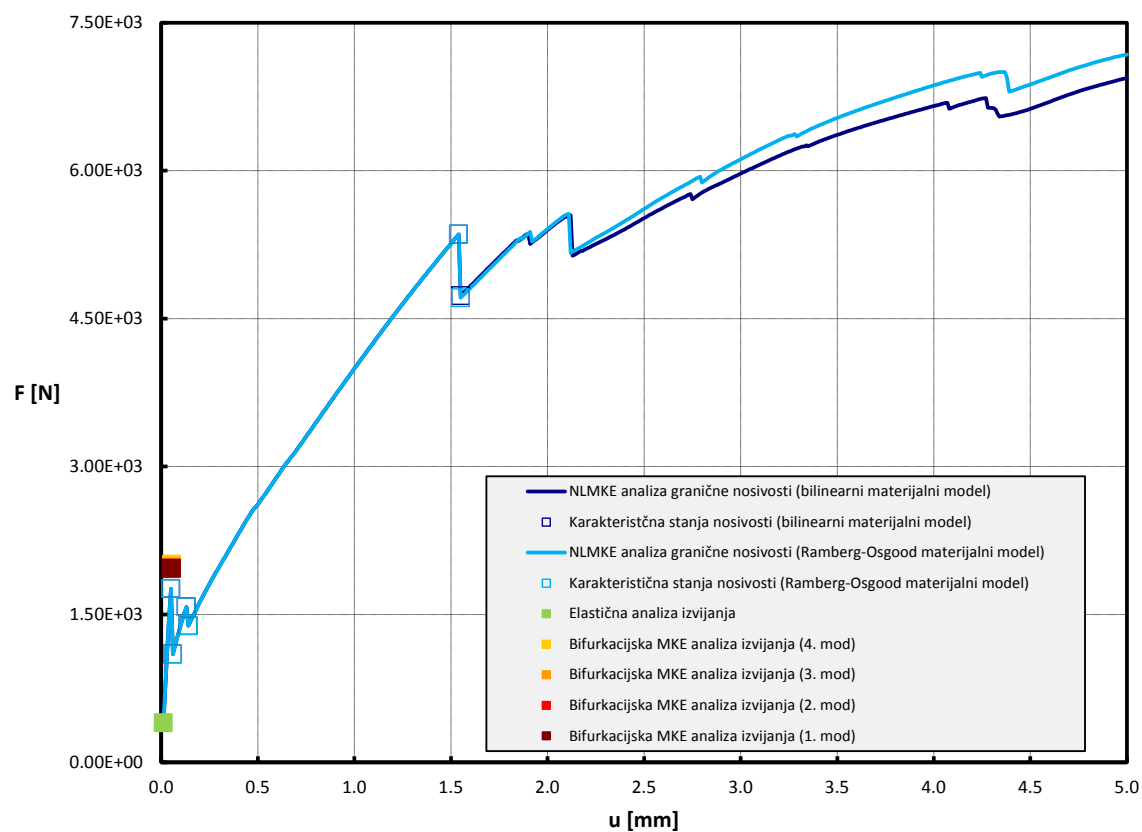
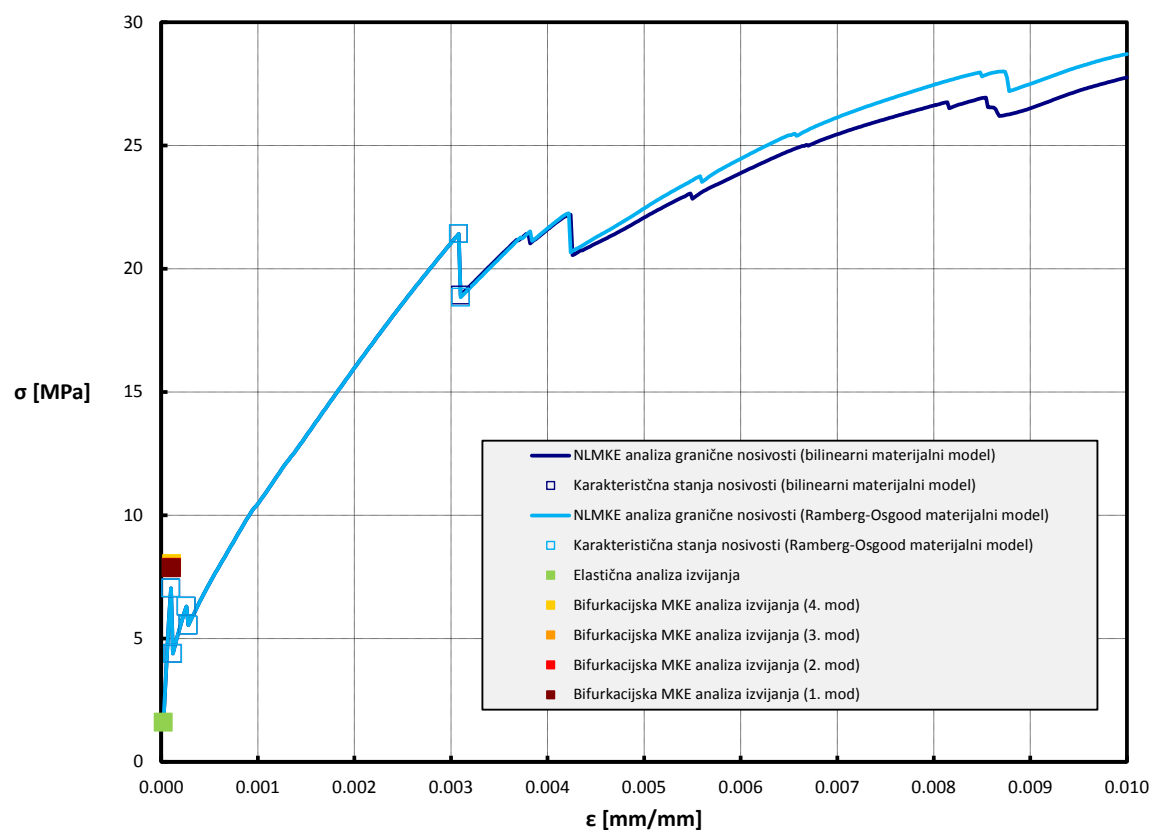
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 27.76	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.010000	-
$F_{U2}$	= 6939.16	N
$u_{U2}$	= 5.00	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 7.0404	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.010000	-
$F_{U3}$	= 7175.28	N
$u_{U3}$	= 5.00	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 38. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR100-T050- R2875 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\epsilon$  i F-u dijagrama:

**Tablica 39. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR100-T350-R1750.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 500	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 3.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 1750	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 1.00	-	$r$	= 1750	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 50	-	$b^e$	= 10	mm
$N^e$	= 2500 (Ukupni broj SS: 15606)		$\alpha^e$	= 1.00	-

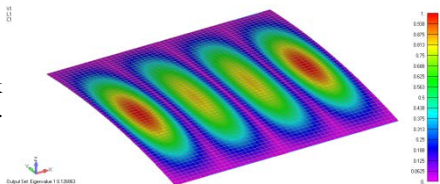
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 57.90	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 101325.00	N
$\varepsilon_E$	= 0.000785	-	$u_E$	= 0.39	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.126863$  ;  $m = 4$ )

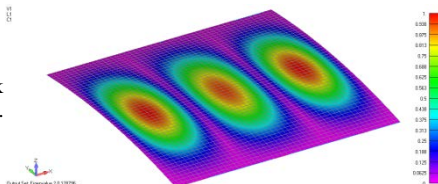
$\sigma_{E1}$	= 93.59	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.001269	-
$F_{E1}$	= 163785.66	N
$u_{E1}$	= 0.63	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.128796$  ;  $m = 3$ )

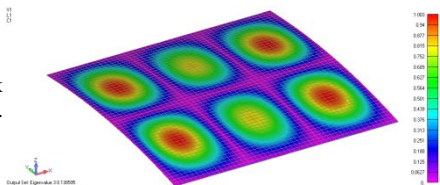
$\sigma_{E2}$	= 95.02	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.001288	-
$F_{E2}$	= 166281.25	N
$u_{E2}$	= 0.64	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.138595$  ;  $m = 6$ )

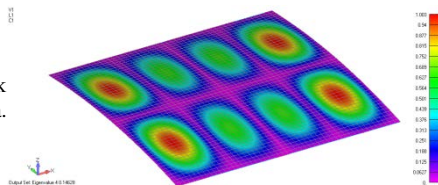
$\sigma_{E3}$	= 94.87	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.001286	-
$F_{E3}$	= 166021.75	N
$u_{E3}$	= 0.64	mm

Treći oblik izvijanja.

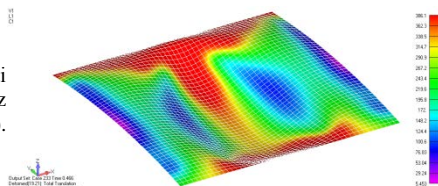
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.14628$  ;  $m = 8$ )

$\sigma_{E4}$	= 107.92	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.001463	-
$F_{E4}$	= 188853.86	N
$u_{E4}$	= 0.73	mm

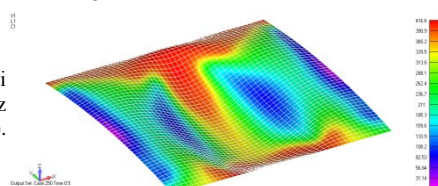
Četvrti oblik izvijanja.

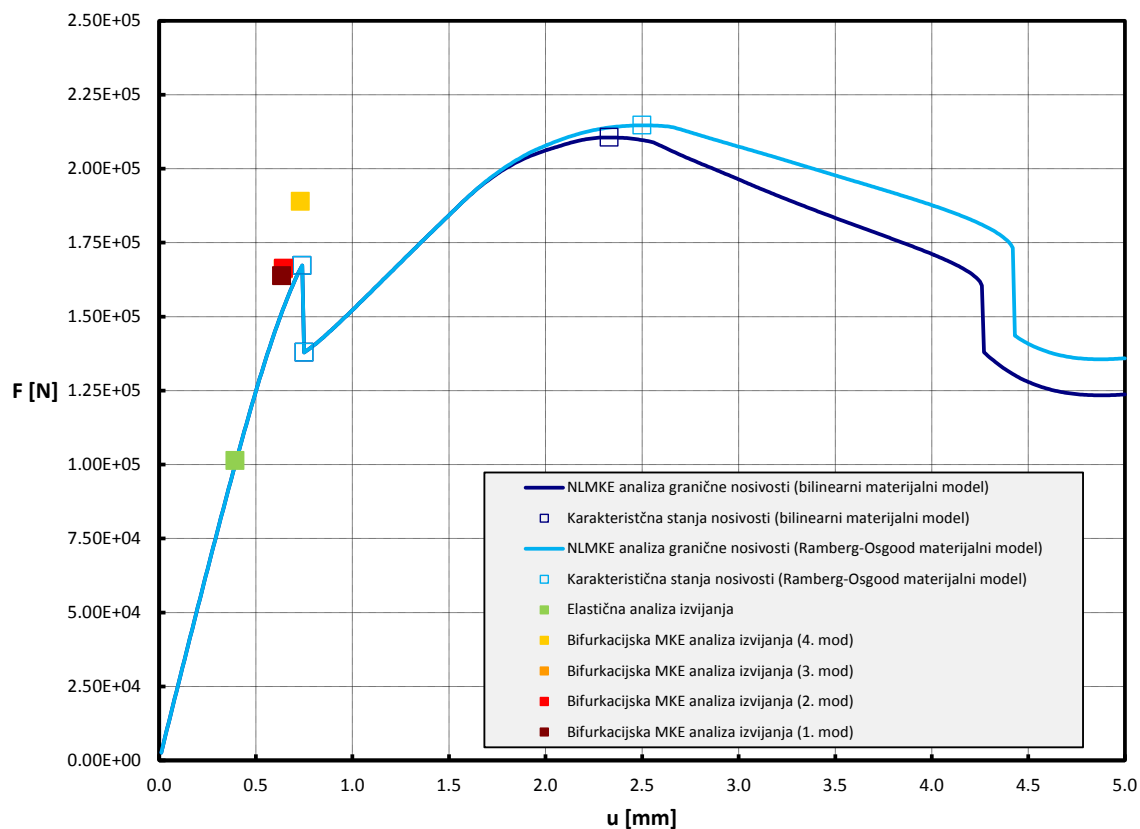
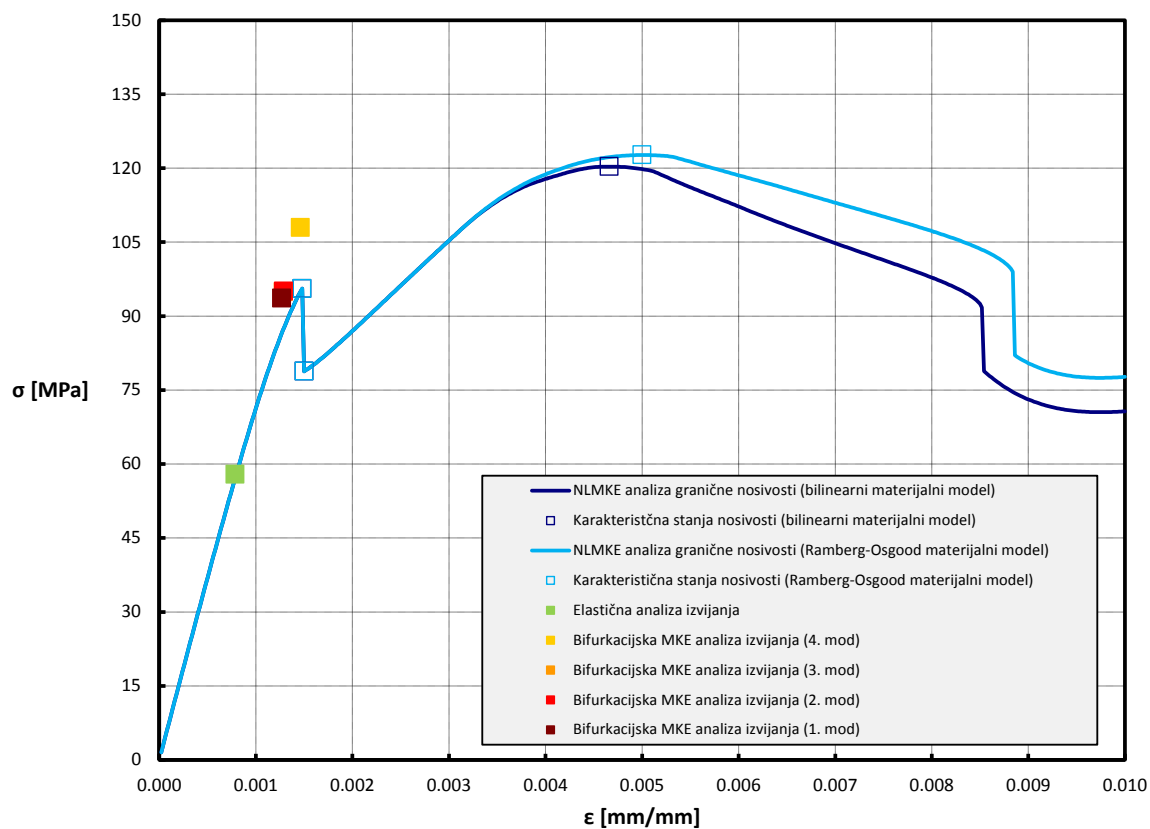
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 120.30	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.004660	-
$F_{U2}$	= 210532.86	N
$u_{U2}$	= 2.33	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 122.66	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.005000	-
$F_{U3}$	= 214648.97	N
$u_{U3}$	= 2.50	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 40. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR100-T350-R1750 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:



**Tablica 41. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR100-T350-R3250.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 500	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 3.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 1750	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 1.00	-	$r$	= 3250	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 50	-	$b^e$	= 10	mm
$N^e$	= 2500 (Ukupni broj SS: 15606)		$\alpha^e$	= 1.00	-

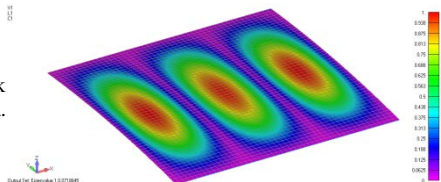
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 29.60	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 51800.00	N
$\varepsilon_E$	= 0.000401	-	$u_E$	= 0.20	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.0718645$  ;  $m = 3$ )

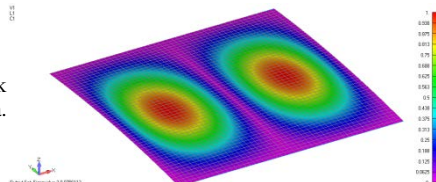
$\sigma_{E1}$	= 53.02	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000719	-
$F_{E1}$	= 92780.20	N
$u_{E1}$	= 0.36	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.0756112$  ;  $m = 2$ )

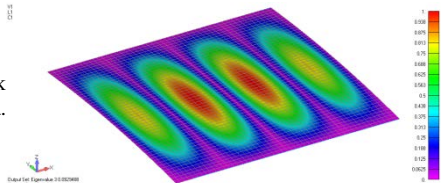
$\sigma_{E2}$	= 55.78	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000756	-
$F_{E2}$	= 97617.36	N
$u_{E2}$	= 0.38	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.0929488$  ;  $m = 4$ )

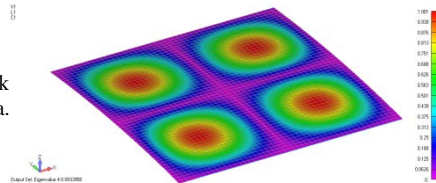
$\sigma_{E3}$	= 68.57	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000929	-
$F_{E3}$	= 120000.95	N
$u_{E3}$	= 0.46	mm

Treći oblik izvijanja.

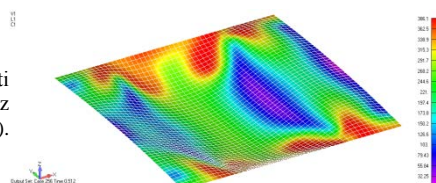
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.0933958$  ;  $m = 4$ )

$\sigma_{E4}$	= 68.90	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000934	-
$F_{E4}$	= 120578.05	N
$u_{E4}$	= 0.47	mm

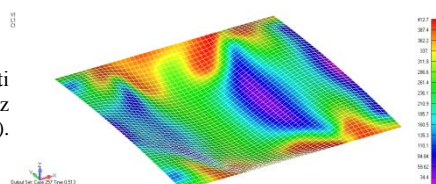
Četvrti oblik izvijanja.

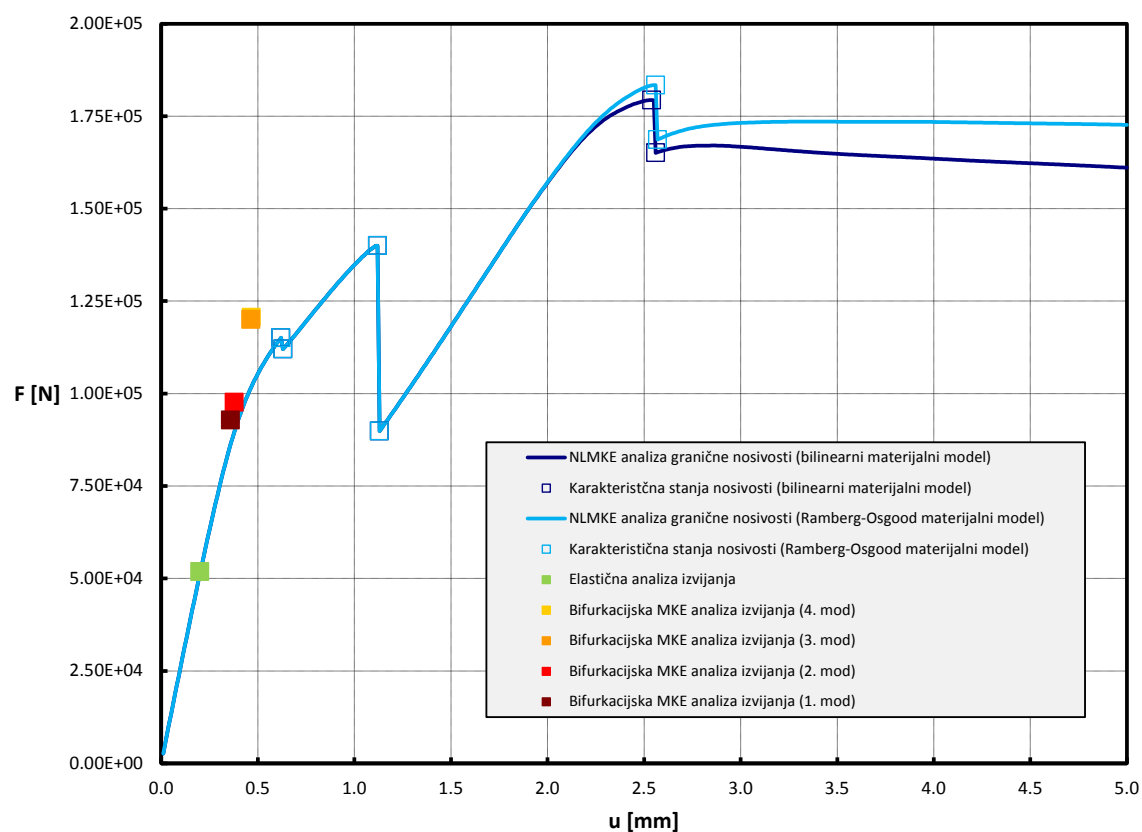
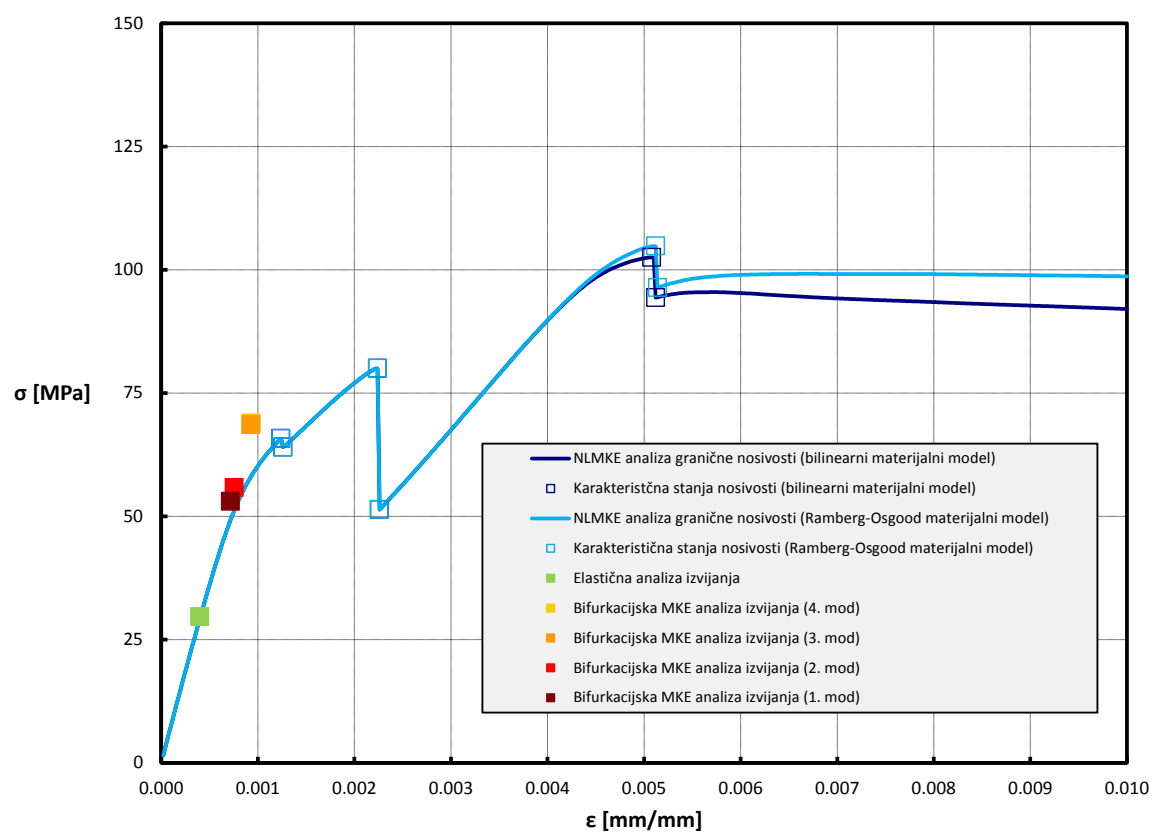
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 102.48	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.005080	-
$F_{U2}$	= 179348.09	N
$u_{U2}$	= 2.54	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 104.79	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.005100	-
$F_{U3}$	= 183378.06	N
$u_{U3}$	= 2.55	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 42. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR100-T350-R3250(nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:



Tablica 43. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR100-T650-R2125.

**Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 500	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 6.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 3250	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 1.00	-	$r$	= 2125	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 50	-	$b^e$	= 10	mm
$N^e$	= 2500 (Ukupni broj SS: 15606)		$\alpha^e$	= 1.00	-

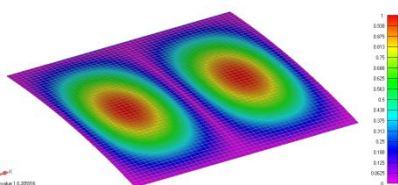
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 109.40	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 355550.00	N
$\varepsilon_E$	= 0.001483	-	$u_E$	= 0.74	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.205916$ ;  $m = 2$ )

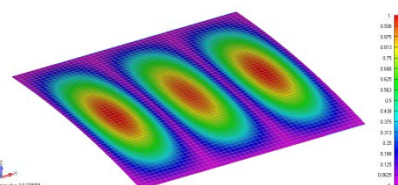
$\sigma_{E1}$	= 151.91	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.002059	-
$F_{E1}$	= 493714.99	N
$u_{E1}$	= 1.03	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.220084$ ;  $m = 3$ )

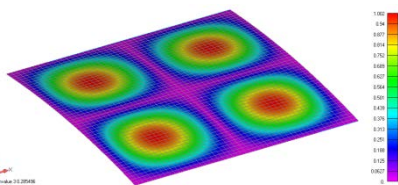
$\sigma_{E2}$	= 162.36	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.002201	-
$F_{E2}$	= 527684.93	N
$u_{E2}$	= 1.10	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.285496$ ;  $m = 4$ )

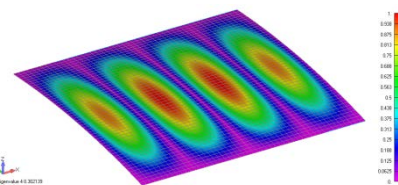
$\sigma_{E3}$	= 210.62	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.002855	-
$F_{E3}$	= 684520.17	N
$u_{E3}$	= 1.43	mm

Treći oblik izvijanja.

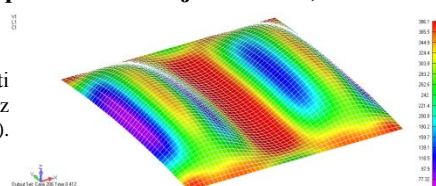
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.302139$ ;  $m = 4$ )

$\sigma_{E4}$	= 222.90	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.003021	-
$F_{E4}$	= 724424.30	N
$u_{E4}$	= 1.51	mm

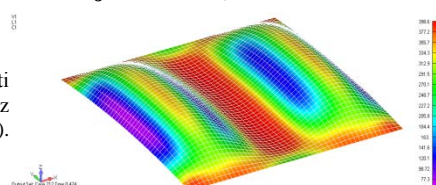
Četvrti oblik izvijanja.

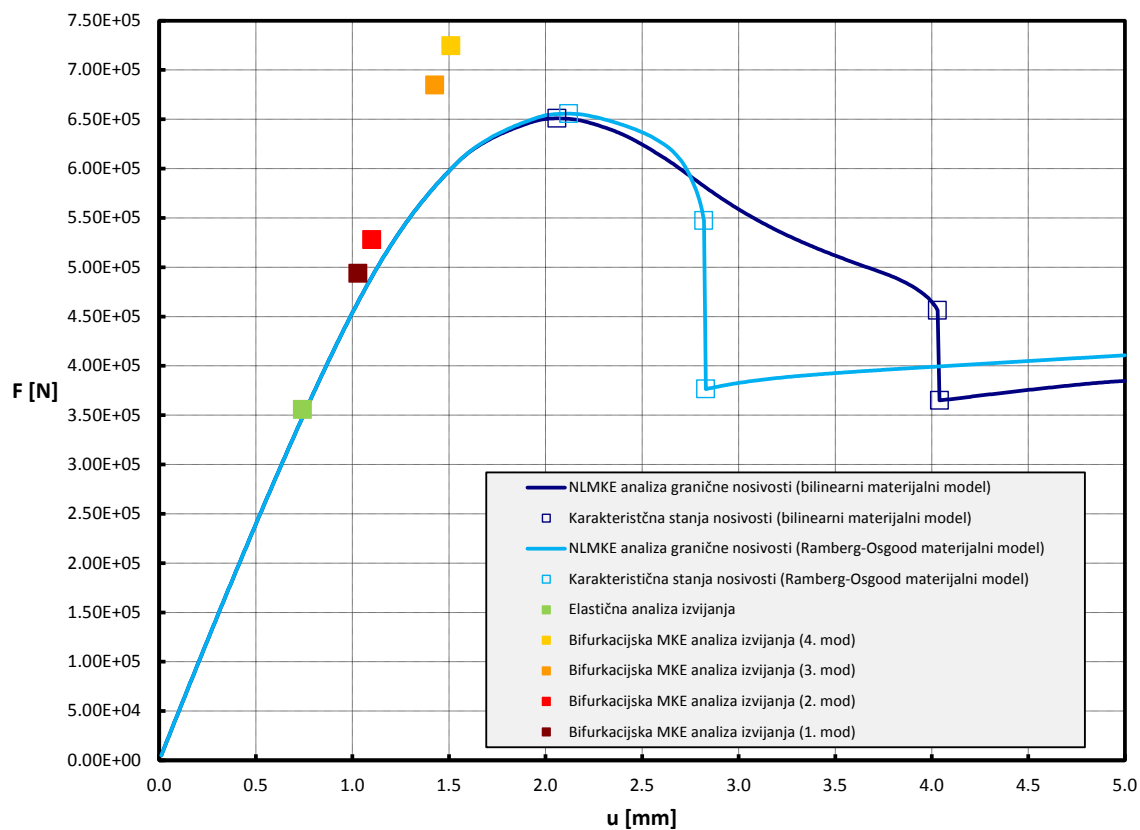
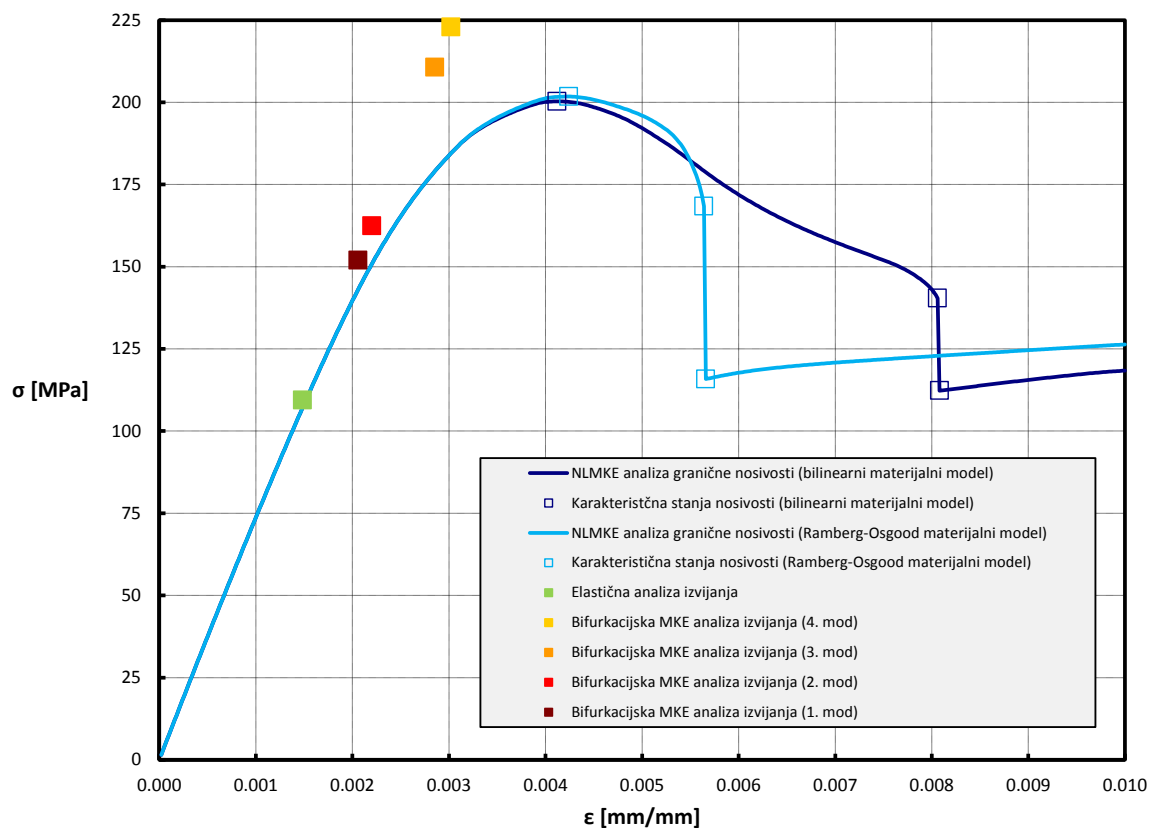
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 200.27	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.004120	-
$F_{U2}$	= 650892.89	N
$u_{U2}$	= 2.06	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 201.74	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.004240	-
$F_{U3}$	= 655669.87	N
$u_{U3}$	= 2.12	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 44. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR100-T650-R2125 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\epsilon$  i F-u dijagrama:

**Tablica 45. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR100-T650-R3250.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 500	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 6.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 3250	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 1.00	-	$r$	= 3250	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 50	-	$b^e$	= 10	mm
$N^e$	= 2500 (Ukupni broj SS: 15606)		$\alpha^e$	= 1.00	-

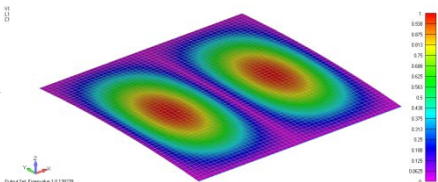
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 76.90	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 249925.00	N
$\varepsilon_E$	= 0.001042	-	$u_E$	= 0.52	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.138239$  ;  $m = 2$ )

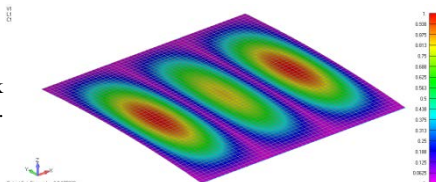
$\sigma_{E1}$	= 101.98	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.001382	-
$F_{E1}$	= 331449.07	N
$u_{E1}$	= 0.69	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.185928$  ;  $m = 3$ )

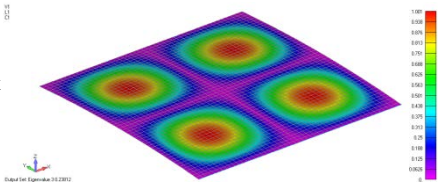
$\sigma_{E2}$	= 137.17	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.001859	-
$F_{E2}$	= 445790.72	N
$u_{E2}$	= 0.93	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.23812$  ;  $m = 4$ )

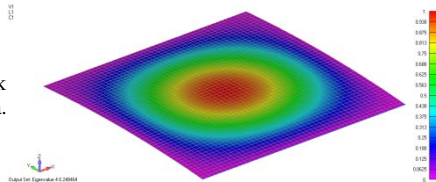
$\sigma_{E3}$	= 175.67	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.002381	-
$F_{E3}$	= 570928.99	N
$u_{E3}$	= 1.19	mm

Treći oblik izvijanja.

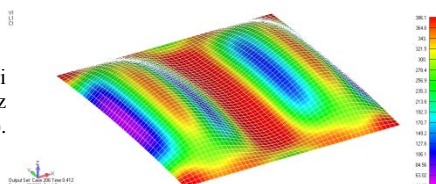
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.248464$  ;  $m = 1$ )

$\sigma_{E4}$	= 183.30	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.002485	-
$F_{E4}$	= 595730.31	N
$u_{E4}$	= 1.24	mm

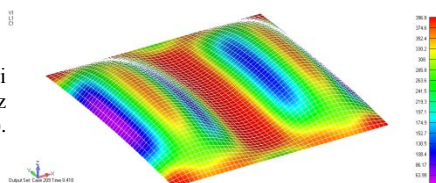
Četvrti oblik izvijanja.

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 186.51	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.004120	-
$F_{U2}$	= 606155.53	N
$u_{U2}$	= 2.06	mm

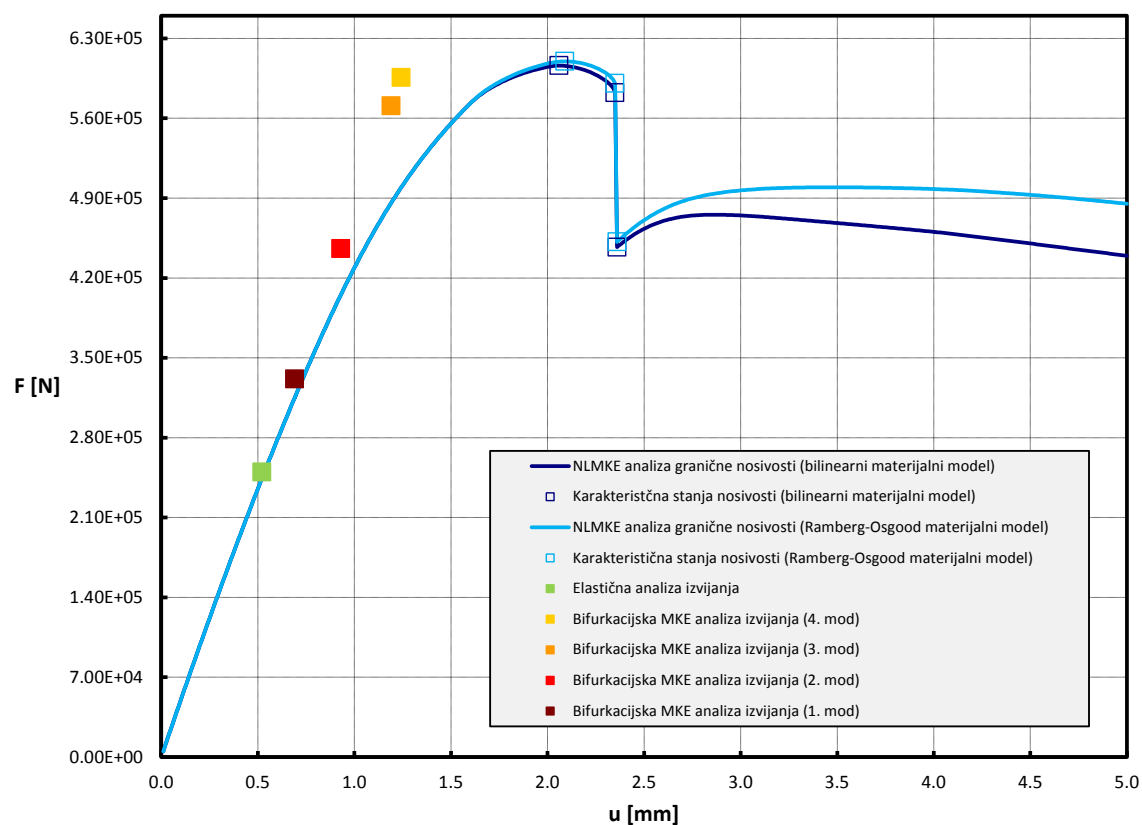
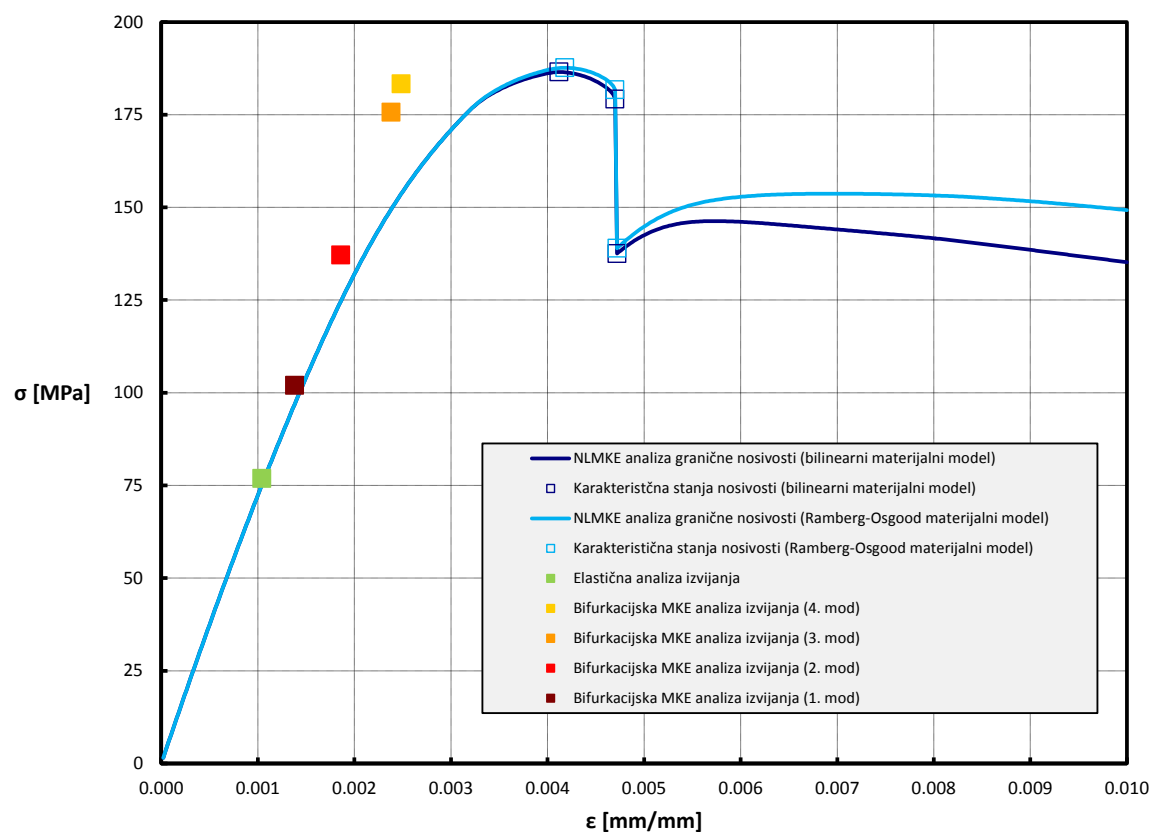
Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 187.66	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.004180	-
$F_{U3}$	= 609897.51	N
$u_{U3}$	= 2.09	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 46. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR100-T650-R3250 (nastavak).**

Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\epsilon$  i F-u dijagrama:



**Tablica 47. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR175-T200-R1750.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 285.71	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 2.00	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 571.43	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 1.75	-	$r$	= 1750	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 30	-	$b^e$	= 9.584	mm
$N^e$	= 1500 (Ukupni broj SS: 9486)		$\alpha^e$	= 1.05	-

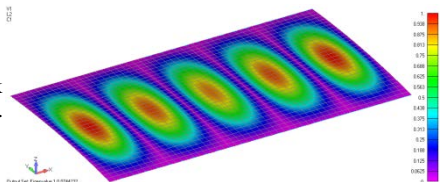
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 30.50	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 17428.55	N
$\varepsilon_E$	= 0.000413	-	$u_E$	= 0.21	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.0744232$  ;  $m = 5$ )

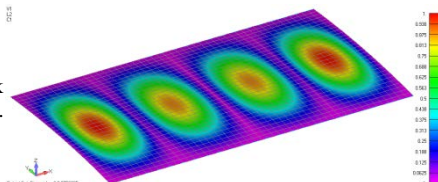
$\sigma_{E1}$	= 54.91	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000744	-
$F_{E1}$	= 31378.04	N
$u_{E1}$	= 0.37	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.0759385$  ;  $m = 4$ )

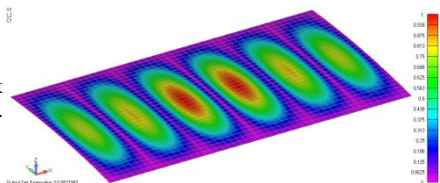
$\sigma_{E2}$	= 56.02	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000759	-
$F_{E2}$	= 32013.00	N
$u_{E2}$	= 0.38	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.0821983$  ;  $m = 6$ )

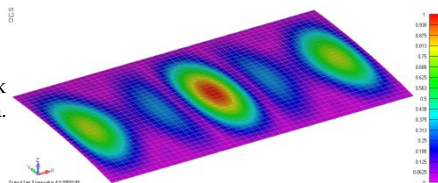
$\sigma_{E3}$	= 60.64	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000822	-
$F_{E3}$	= 34651.91	N
$u_{E3}$	= 0.41	mm

Treći oblik izvijanja.

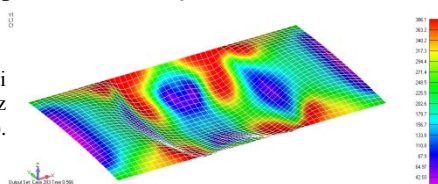
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.0958145$  ;  $m = 5$ )

$\sigma_{E4}$	= 70.69	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000958	-
$F_{E4}$	= 40392.02	N
$u_{E4}$	= 0.48	mm

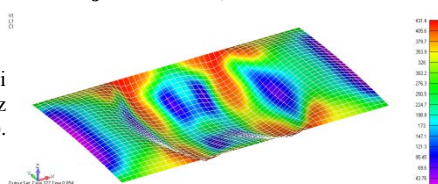
Četvrti oblik izvijanja.

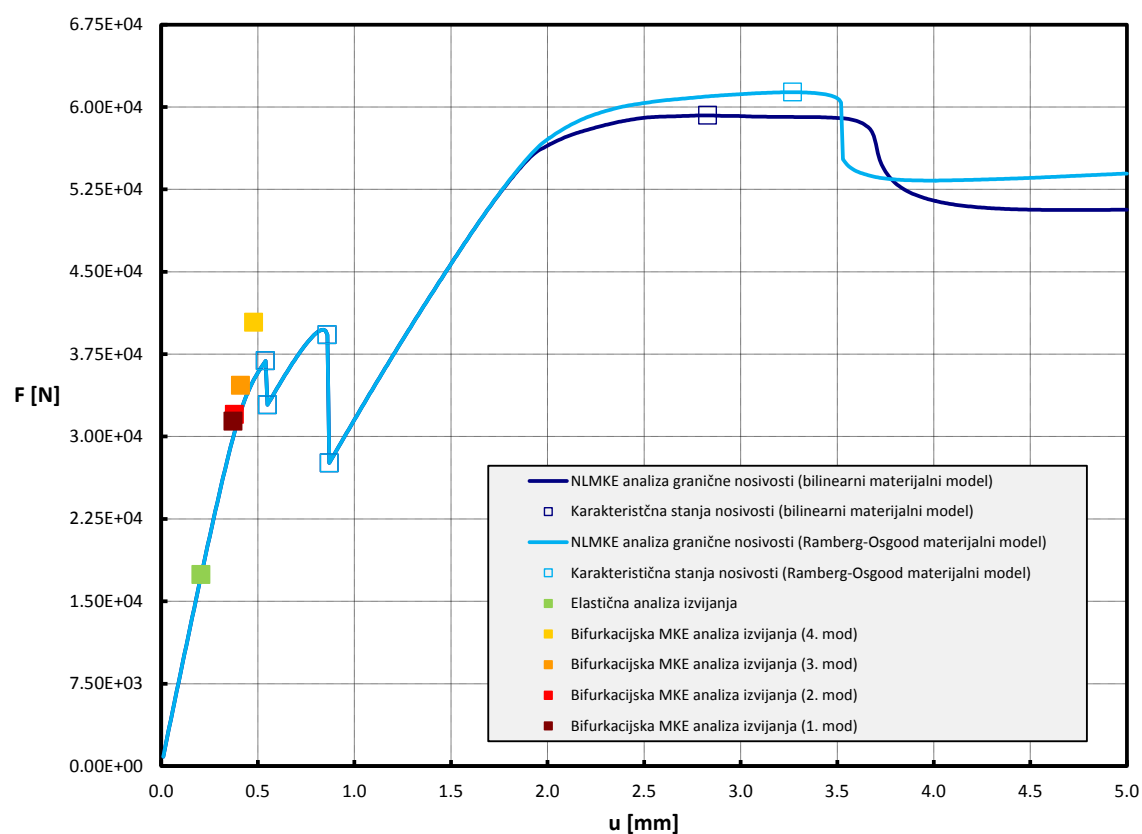
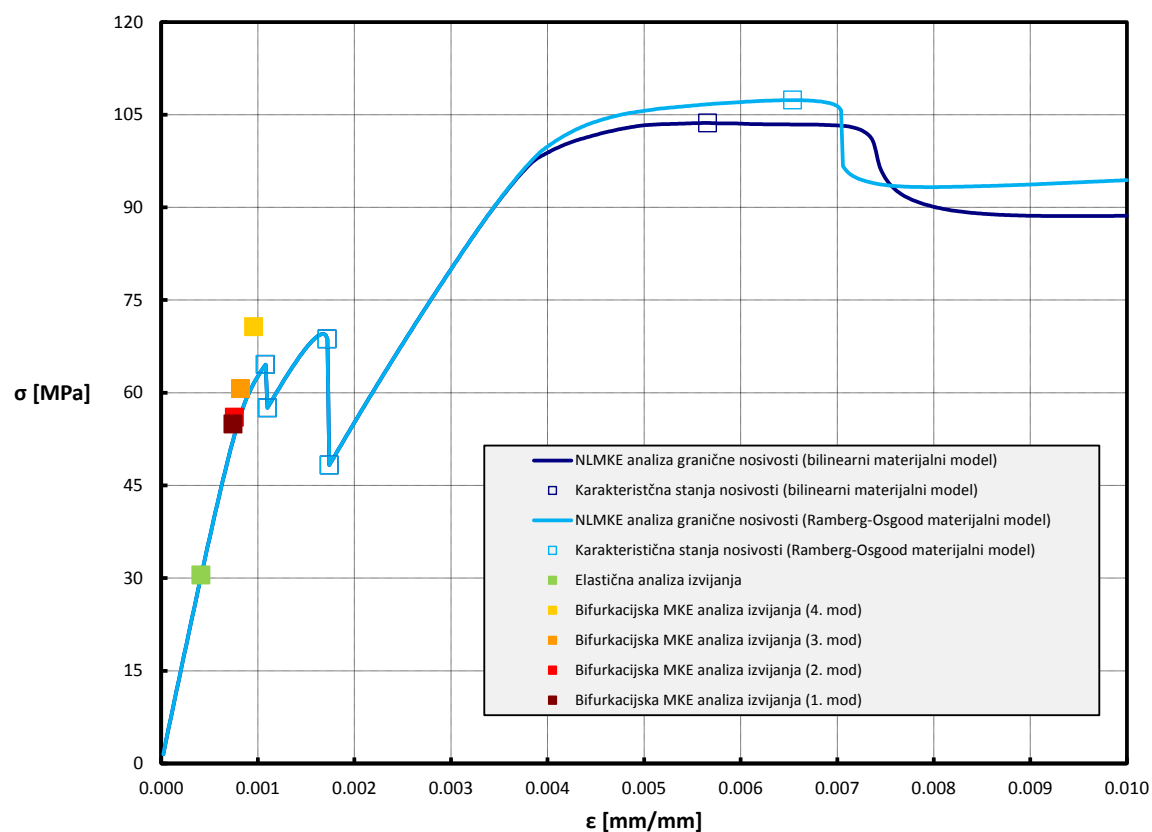
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 103.66	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.005660	-
$F_{U2}$	= 59231.47	N
$u_{U2}$	= 2.83	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 107.35	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.006540	-
$F_{U3}$	= 61343.29	N
$u_{U3}$	= 3.27	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 48. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR175-T200-R1750 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\epsilon$  i F-u dijagrama:



**Tablica 49. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR175-T500-R2875.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 285.71	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 5.00	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 1428.57	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 1.75	-	$r$	= 2875	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

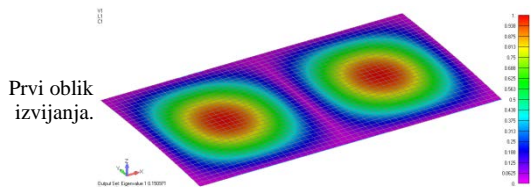
$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 30	-	$b^e$	= 9.584	mm
$N^e$	= 1500 (Ukupni broj SS: 9486)		$\alpha^e$	= 1.05	-

**Elastična analiza izvijanja:**

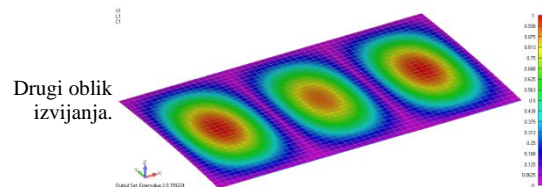
$\sigma_E$	= 108.00	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 154285.56	N
$\varepsilon_E$	= 0.001464	-	$u_E$	= 0.73	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.150971$  ;  $m = 2$ )

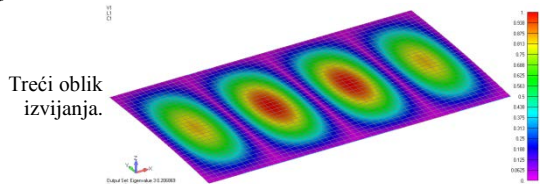
$\sigma_{E1}$	= 111.38	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.001510	-
$F_{E1}$	= 159110.16	N
$u_{E1}$	= 0.75	mm

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.159224$  ;  $m = 3$ )

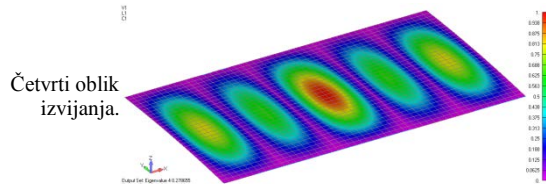
$\sigma_{E2}$	= 117.47	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.001592	-
$F_{E2}$	= 167808.10	N
$u_{E2}$	= 0.80	mm

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.206869$  ;  $m = 4$ )

$\sigma_{E3}$	= 152.62	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.002069	-
$F_{E3}$	= 218021.74	N
$u_{E3}$	= 1.03	mm

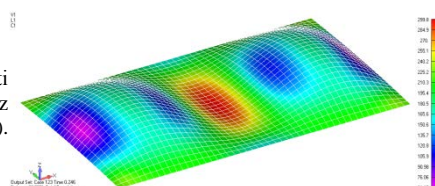
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.278665$  ;  $m = 5$ )

$\sigma_{E4}$	= 205.57	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.002787	-
$F_{E4}$	= 293677.87	N
$u_{E4}$	= 1.39	mm

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

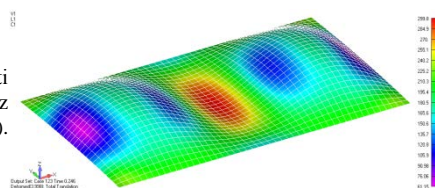
$\sigma_{U2}$	= 182.15	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.005000	-
$F_{U2}$	= 260211.45	N
$u_{U2}$	= 2.50	mm

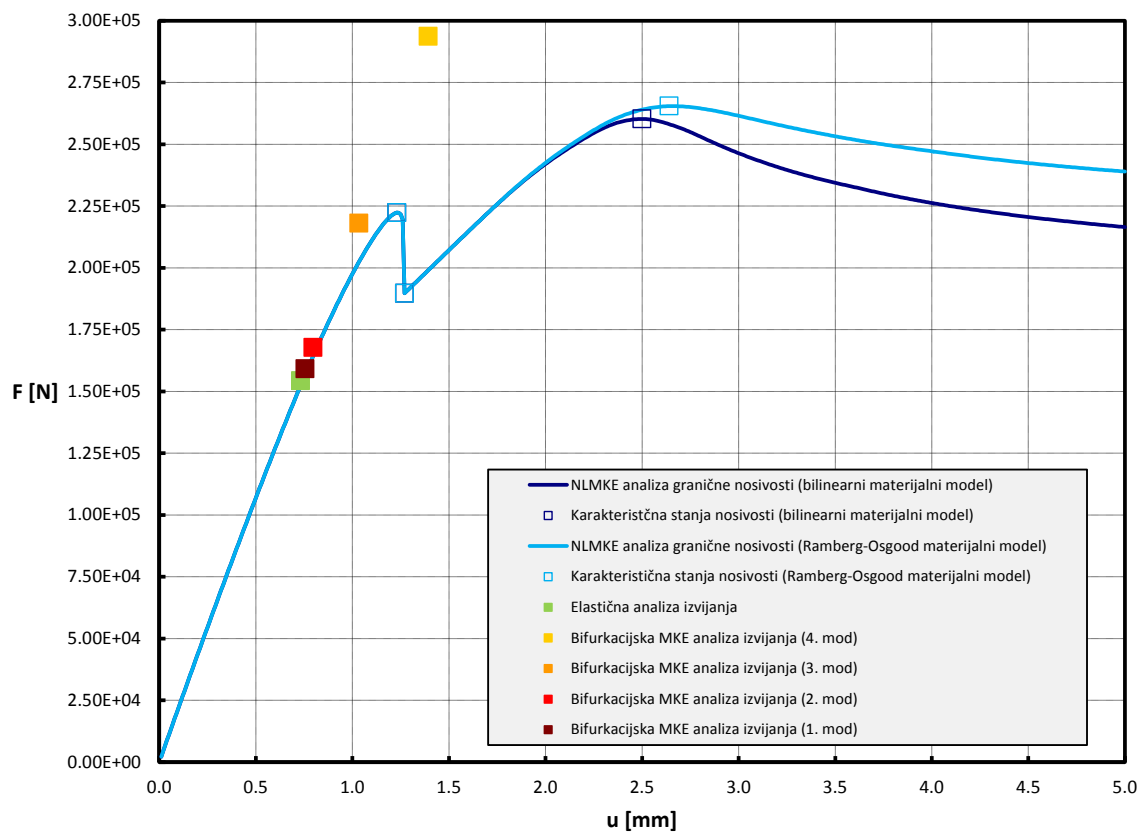
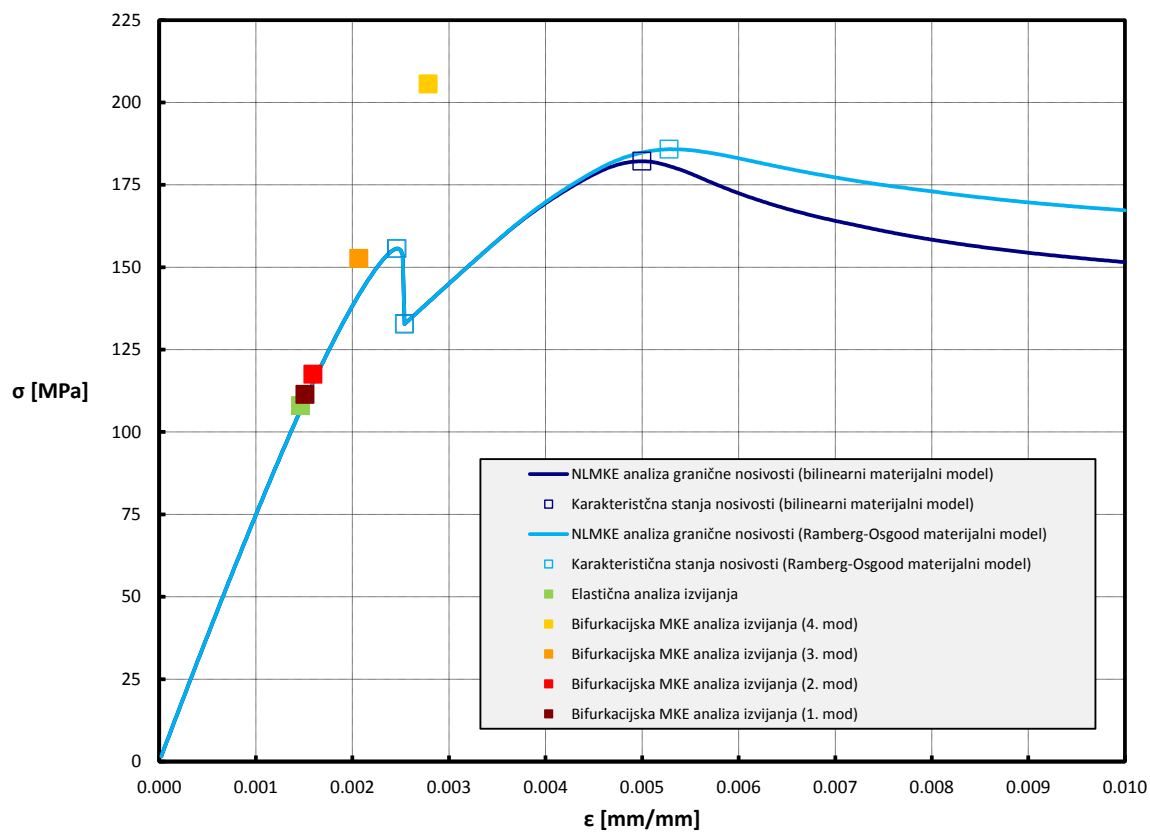
Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 185.81	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.005280	-
$F_{U3}$	= 265441.92	N
$u_{U3}$	= 2.64	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).



**Tablica 50. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR175-T200-R1750 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\epsilon$  i F-u dijagrama:



**Tablica 51. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR250-T200-R2125.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 200	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 2.00	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 400	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 2.50	-	$r$	= 2125	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 20	-	$b^e$	= 10	mm
$N^e$	= 1000 (Ukupni broj SS: 6426)		$\alpha^e$	= 1.00	-

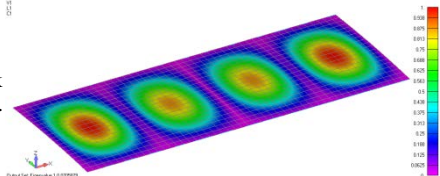
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 41.60	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 16640.00	N
$\varepsilon_E$	= 0.000564	-	$u_E$	= 0.28	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.0705879$  ;  $m = 4$ )

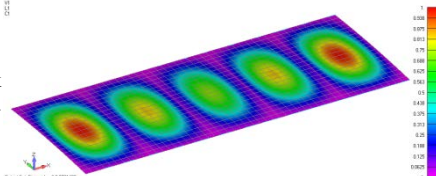
$\sigma_{E1}$	= 52.08	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000706	-
$F_{E1}$	= 20830.18	N
$u_{E1}$	= 0.35	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.0731409$  ;  $m = 5$ )

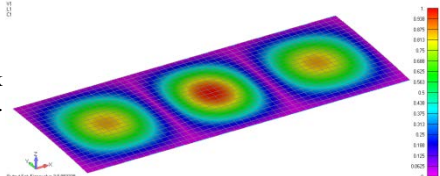
$\sigma_{E2}$	= 53.96	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000731	-
$F_{E2}$	= 21583.56	N
$u_{E2}$	= 0.37	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.0833329$  ;  $m = 3$ )

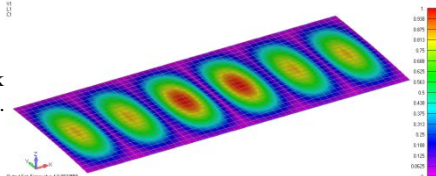
$\sigma_{E3}$	= 61.48	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000833	-
$F_{E3}$	= 24590.03	N
$u_{E3}$	= 0.42	mm

Treći oblik izvijanja.

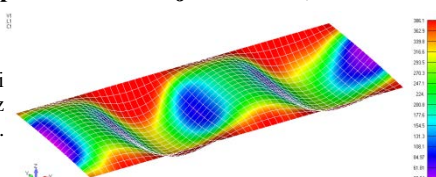
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.0833559$  ;  $m = 6$ )

$\sigma_{E4}$	= 61.49	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000834	-
$F_{E4}$	= 24597.97	N
$u_{E4}$	= 0.42	mm

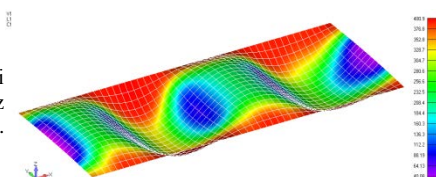
Četvrti oblik izvijanja.

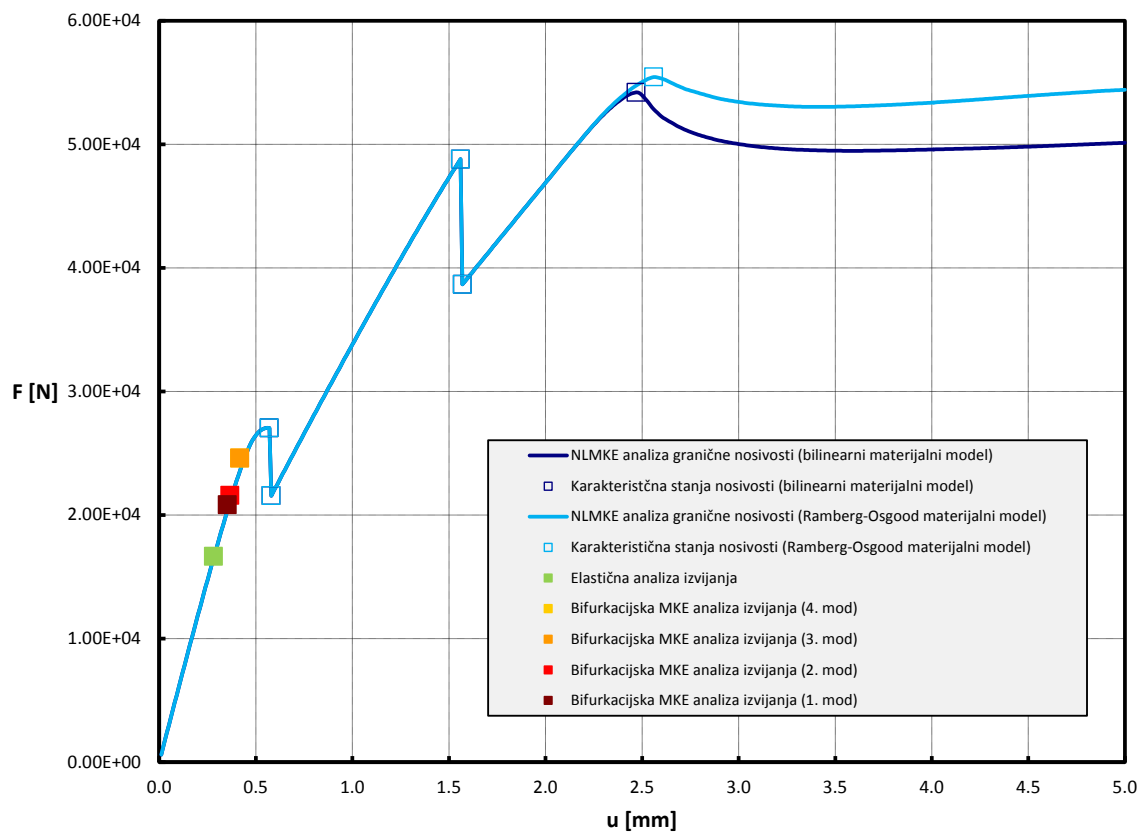
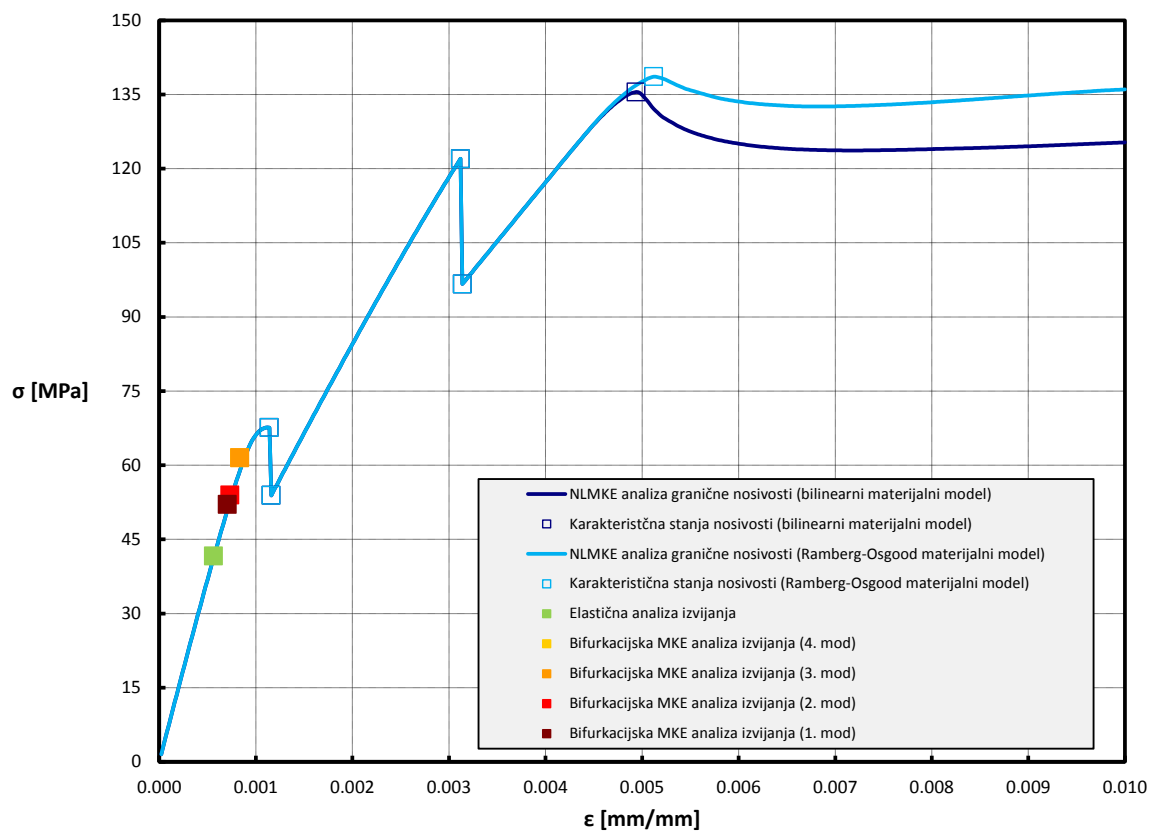
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 135.49	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.004940	-
$F_{U2}$	= 54195.16	N
$u_{U2}$	= 2.47	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM napreznja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 138.60	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.005120	-
$F_{U3}$	= 55440.95	N
$u_{U3}$	= 2.56	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM napreznja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 52. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR250-T200-R2125 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:

**Tablica 53. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR250-T350-R3250.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 200	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 3.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 700	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 2.50	-	$r$	= 3250	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

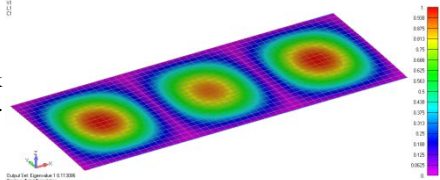
$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 20	-	$b^e$	= 10	mm
$N^e$	= 1000 (Ukupni broj SS: 6426)		$\alpha^e$	= 1.00	-

**Elastična analiza izvijanja:**

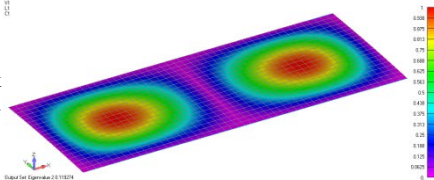
$\sigma_E$	= 96.30	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 67410.00	N
$\varepsilon_E$	= 0.001305	-	$u_E$	= 0.65	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.113006$ ;  $m = 3$ )

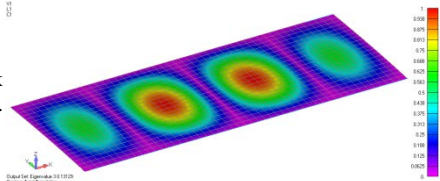
$\sigma_{E1}$	= 83.37	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.001130	-
$F_{E1}$	= 58358.27	N
$u_{E1}$	= 0.57	mm

Prvi oblik  
izvijanja.2. način izvijanja ( $\lambda = 0.119274$ ;  $m = 2$ )

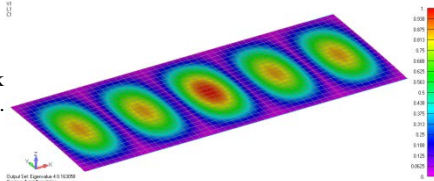
$\sigma_{E2}$	= 87.99	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.001193	-
$F_{E2}$	= 61595.17	N
$u_{E2}$	= 0.60	mm

Drugi oblik  
izvijanja.3. način izvijanja ( $\lambda = 0.13129$ ;  $m = 4$ )

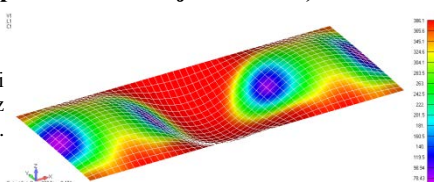
$\sigma_{E3}$	= 96.86	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.001313	-
$F_{E3}$	= 67800.45	N
$u_{E3}$	= 0.66	mm

Treći oblik  
izvijanja.4. način izvijanja ( $\lambda = 0.163058$ ;  $m = 5$ )

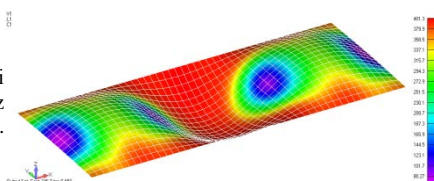
$\sigma_{E4}$	= 120.29	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.001631	-
$F_{E4}$	= 84205.99	N
$u_{E4}$	= 0.82	mm

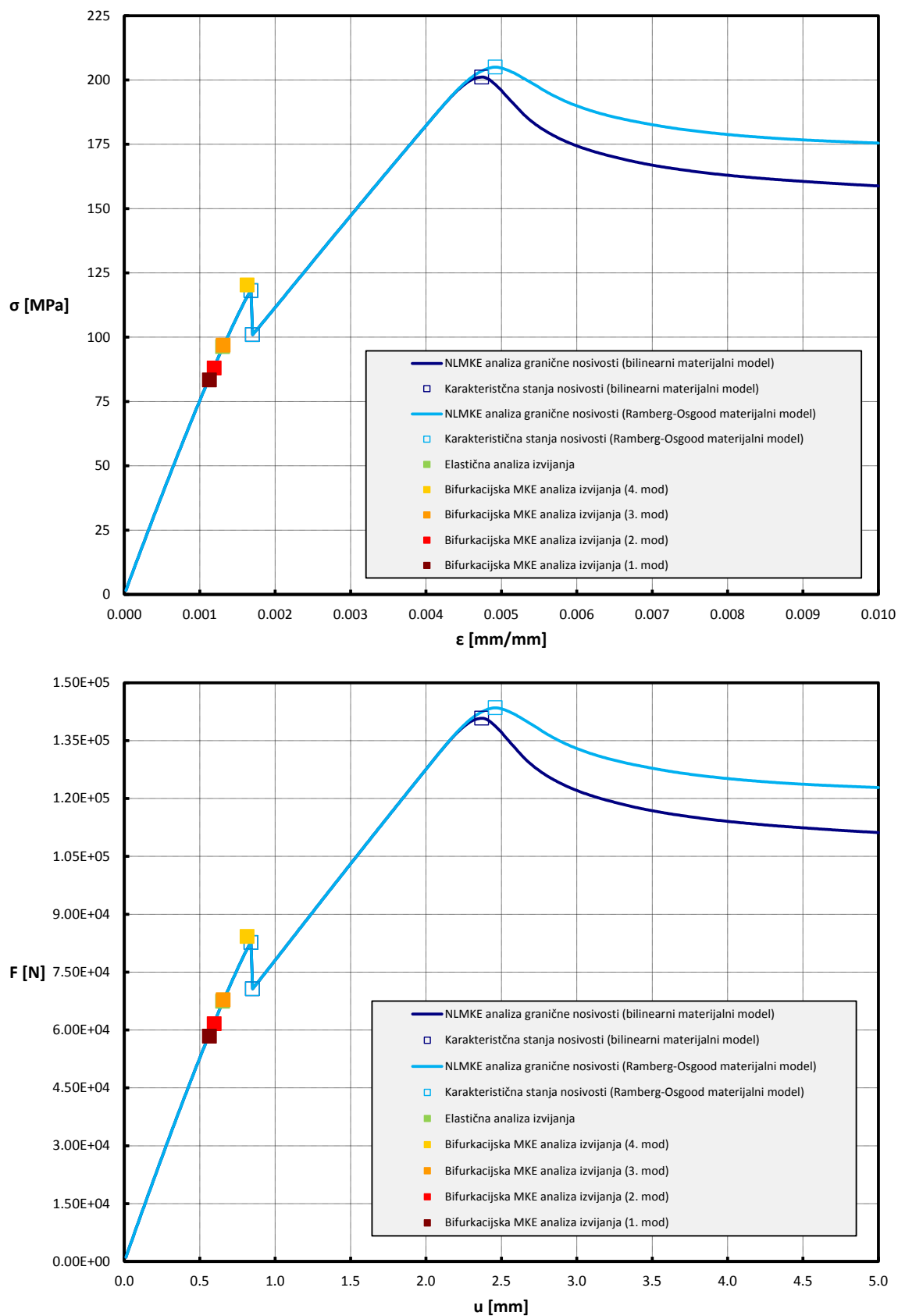
Četvrti oblik  
izvijanja.**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 201.13	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.004740	-
$F_{U2}$	= 140787.72	N
$u_{U2}$	= 2.37	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 205.00	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.004920	-
$F_{U3}$	= 143497.14	N
$u_{U3}$	= 2.46	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 54. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR250-T350-R3250 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\epsilon$  i F-u dijagrama:

**Tablica 55. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR250-T500-R1750.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 200	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 3.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 1000	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 2.50	-	$r$	= 1750	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 20	-	$b^e$	= 10	mm
$N^e$	= 1000 (Ukupni broj SS: 6426)		$\alpha^e$	= 1.00	-

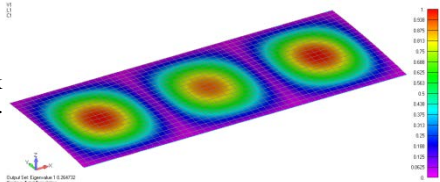
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 208.30	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 208300.00	N
$\varepsilon_E$	= 0.002823	-	$u_E$	= 1.41	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.264732$ ;  $m = 3$ )

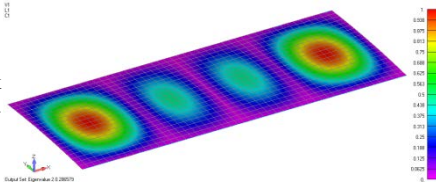
$\sigma_{E1}$	= 195.30	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.002647	-
$F_{E1}$	= 195303.17	N
$u_{E1}$	= 1.32	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.286579$ ;  $m = 4$ )

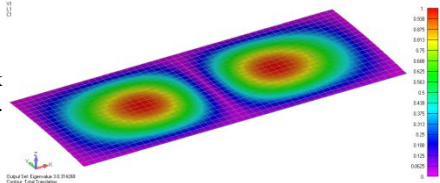
$\sigma_{E2}$	= 211.42	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.002866	-
$F_{E2}$	= 211420.56	N
$u_{E2}$	= 1.43	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.314268$ ;  $m = 2$ )

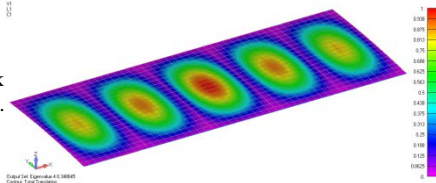
$\sigma_{E3}$	= 231.85	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.003143	-
$F_{E3}$	= 231847.82	N
$u_{E3}$	= 1.57	mm

Treći oblik izvijanja.

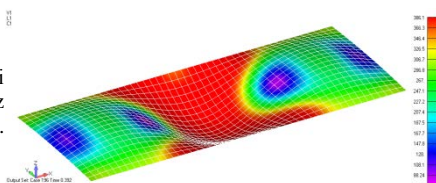
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.348645$ ;  $m = 5$ )

$\sigma_{E4}$	= 257.21	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.003486	-
$F_{E4}$	= 257209.08	N
$u_{E4}$	= 1.74	mm

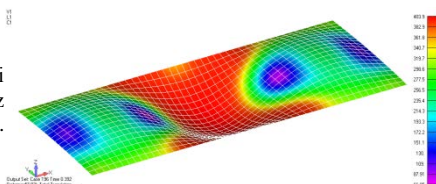
Četvrti oblik izvijanja.

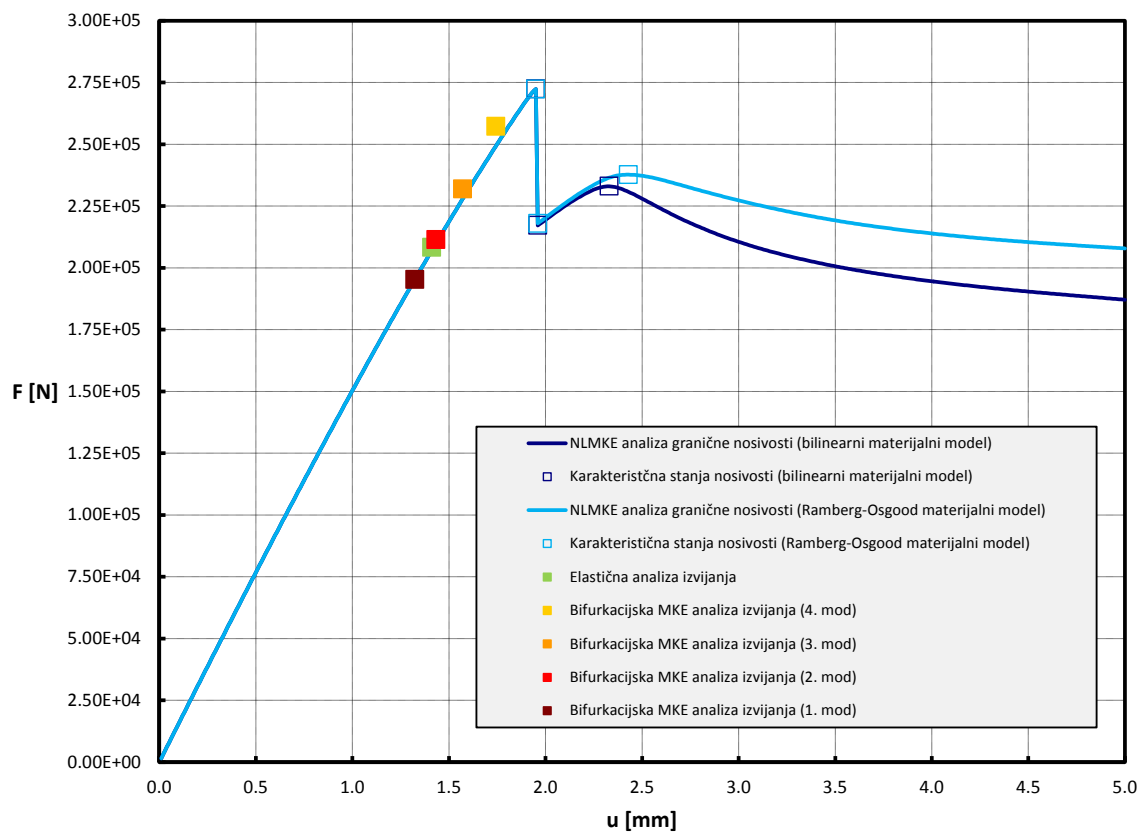
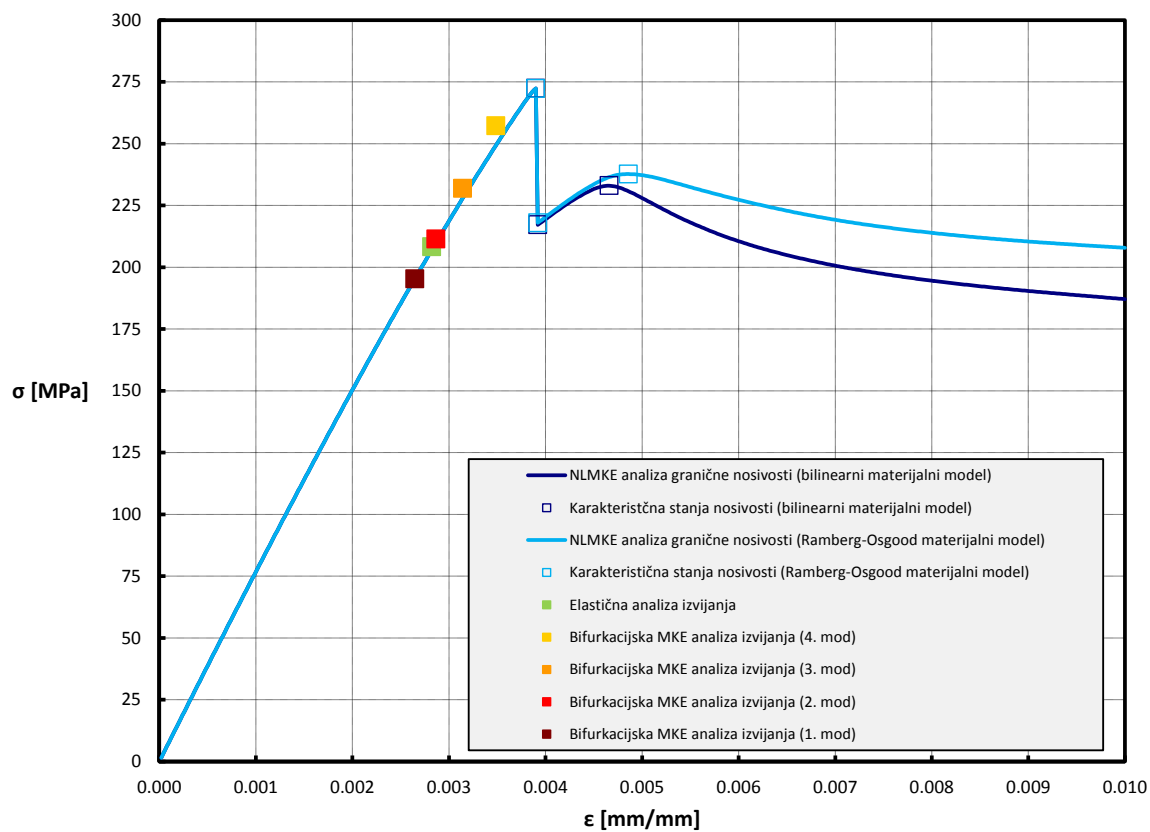
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 272.37	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.003900	-
$F_{U2}$	= 272369.93	N
$u_{U2}$	= 1.95	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM napreznja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 272.31	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.003900	-
$F_{U3}$	= 272314.74	N
$u_{U3}$	= 1.95	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM napreznja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 56. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR250-T500-R1750 (nastavak).****Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\epsilon$  i F-u dijagrama:**



**Tablica 57. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR250-T650-R2500.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 200	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 6.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 1300	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 2.50	-	$r$	= 2500	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 20	-	$b^e$	= 10	mm
$N^e$	= 1000 (Ukupni broj SS: 6426)		$\alpha^e$	= 1.00	-

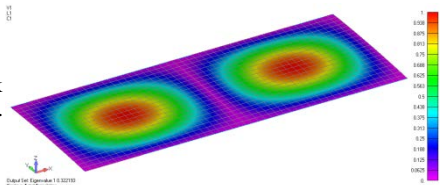
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 312.20	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 405860.00	N
$\varepsilon_E$	= 0.004233	-	$u_E$	= 2.12	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.322193$ ;  $m = 2$ )

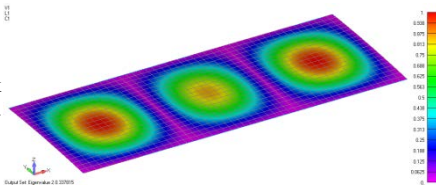
$\sigma_{E1}$	= 237.69	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.003222	-
$F_{E1}$	= 309002.73	N
$u_{E1}$	= 1.61	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.337815$ ;  $m = 3$ )

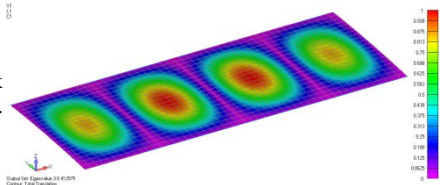
$\sigma_{E2}$	= 249.22	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.003378	-
$F_{E2}$	= 323985.18	N
$u_{E2}$	= 1.69	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.412575$ ;  $m = 4$ )

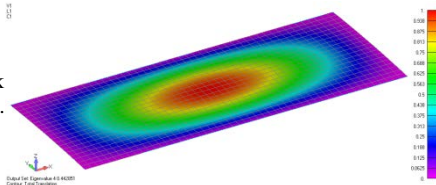
$\sigma_{E3}$	= 304.37	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.004126	-
$F_{E3}$	= 395684.58	N
$u_{E3}$	= 2.06	mm

Treći oblik izvijanja.

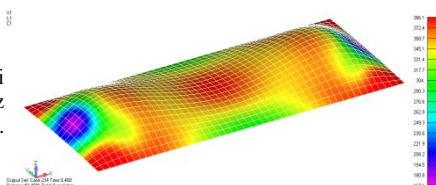
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.442851$ ;  $m = 1$ )

$\sigma_{E4}$	= 326.71	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.004429	-
$F_{E4}$	= 424721.11	N
$u_{E4}$	= 2.21	mm

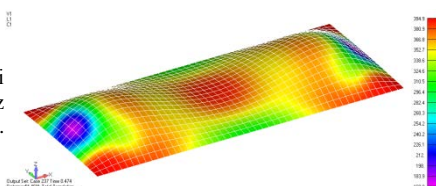
Četvrti oblik izvijanja.

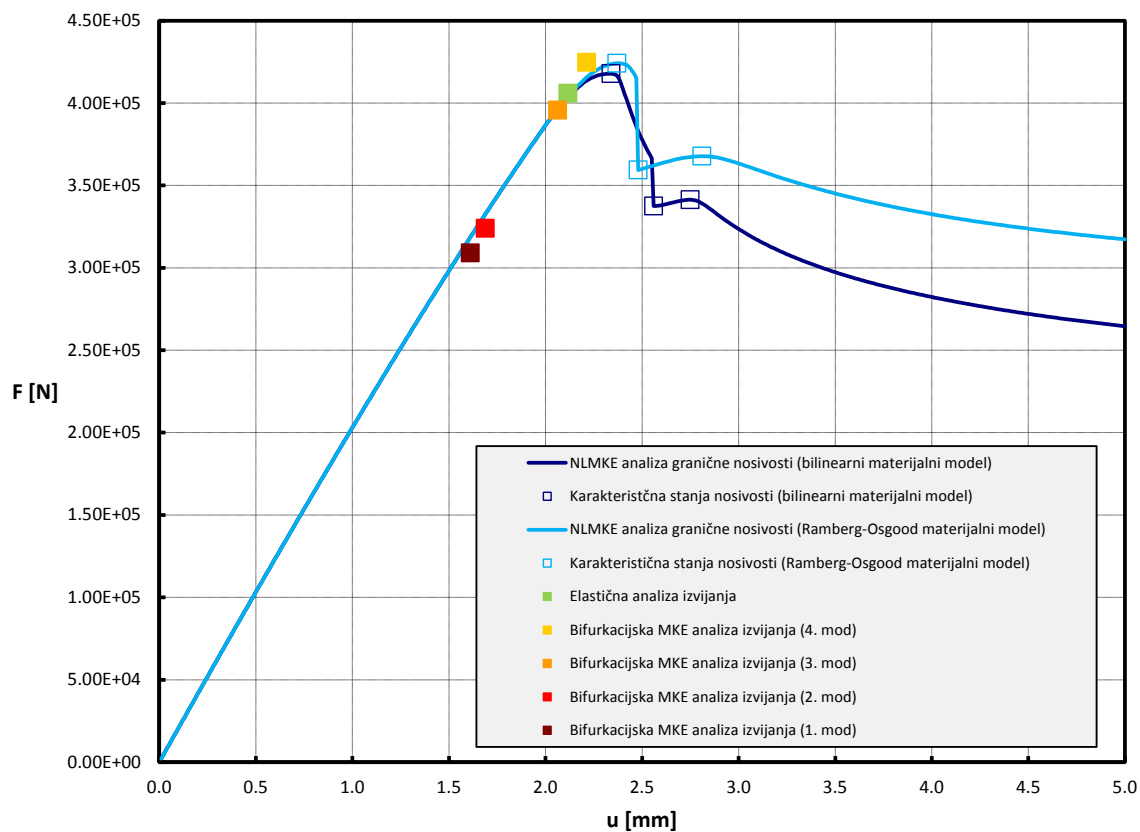
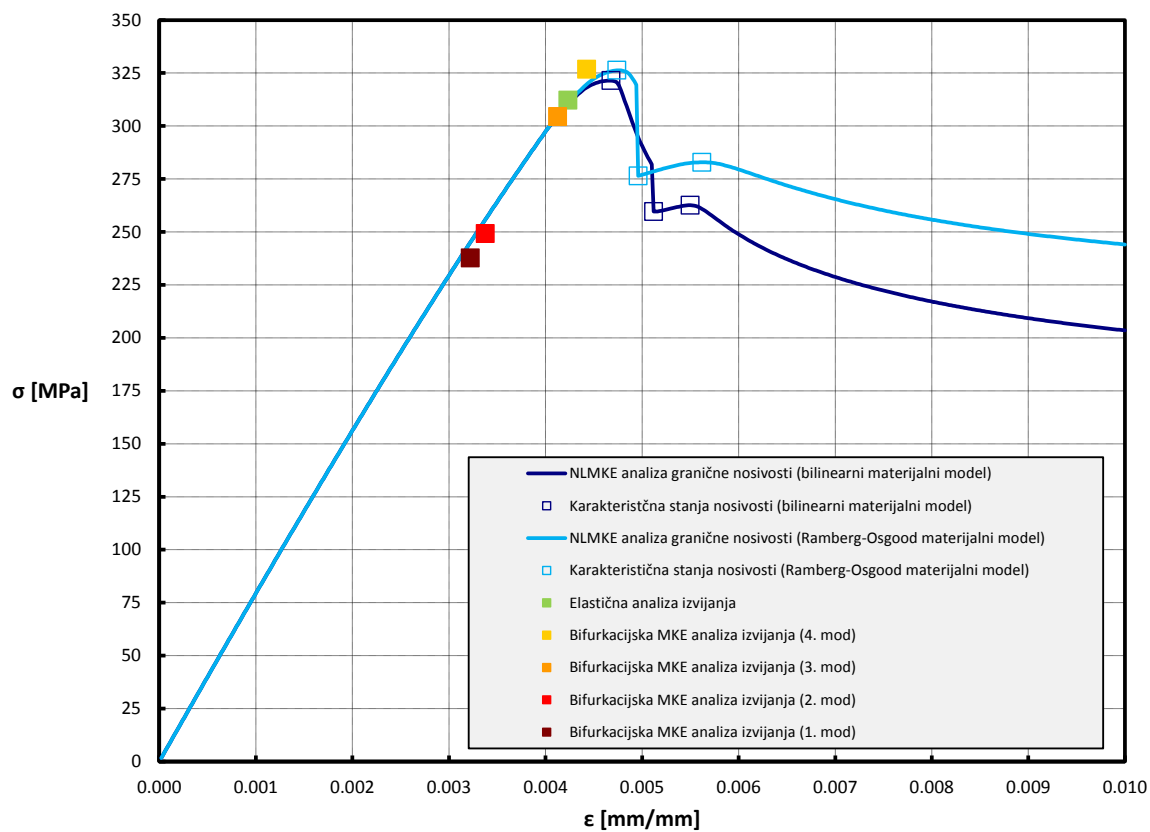
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 321.39	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.004660	-
$F_{U2}$	= 417812.84	N
$u_{U2}$	= 2.33	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 326.28	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.004740	-
$F_{U3}$	= 424162.80	N
$u_{U3}$	= 2.37	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 58. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR250-T650-R2500 (nastavak).****Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\epsilon$  i F-u dijagrama:**



**Tablica 59. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR325-T050-R1750.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 153.846	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 0.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 76.92	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 3.25	-	$r$	= 1750	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 16	-	$b^e$	= 9.615	mm
$N^e$	= 800 (Ukupni broj SS: 5202)		$\alpha^e$	= 1.04	-

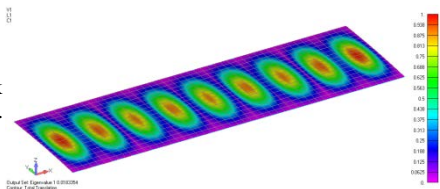
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 7.10	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 546.15	N
$\varepsilon_E$	= 0.000096	-	$u_E$	= 0.05	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.0183354$  ;  $m = 9$ )

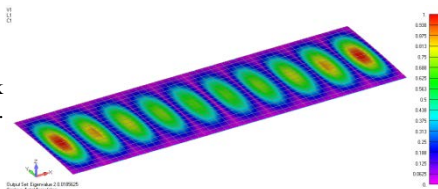
$\sigma_{E1}$	= 13.53	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000183	-
$F_{E1}$	= 1040.52	N
$u_{E1}$	= 0.09	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.0185625$  ;  $m = 10$ )

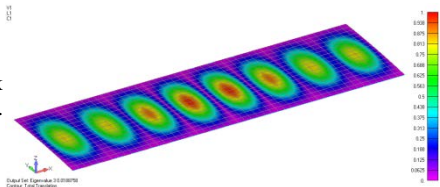
$\sigma_{E2}$	= 13.69	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000186	-
$F_{E2}$	= 1053.41	N
$u_{E2}$	= 0.09	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.0188758$  ;  $m = 8$ )

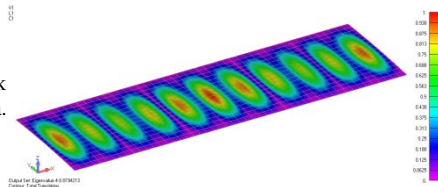
$\sigma_{E3}$	= 13.93	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000189	-
$F_{E3}$	= 1071.18	N
$u_{E3}$	= 0.09	mm

Treći oblik izvijanja.

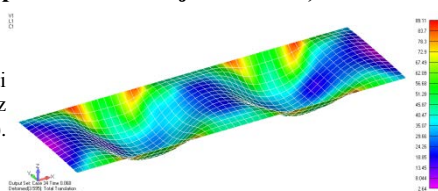
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.0194213$  ;  $m = 11$ )

$\sigma_{E4}$	= 14.33	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000194	-
$F_{E4}$	= 1102.14	N
$u_{E4}$	= 0.10	mm

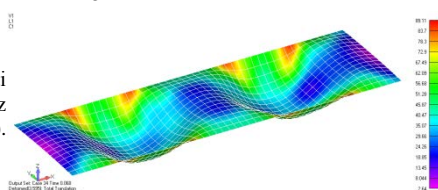
Četvrti oblik izvijanja.

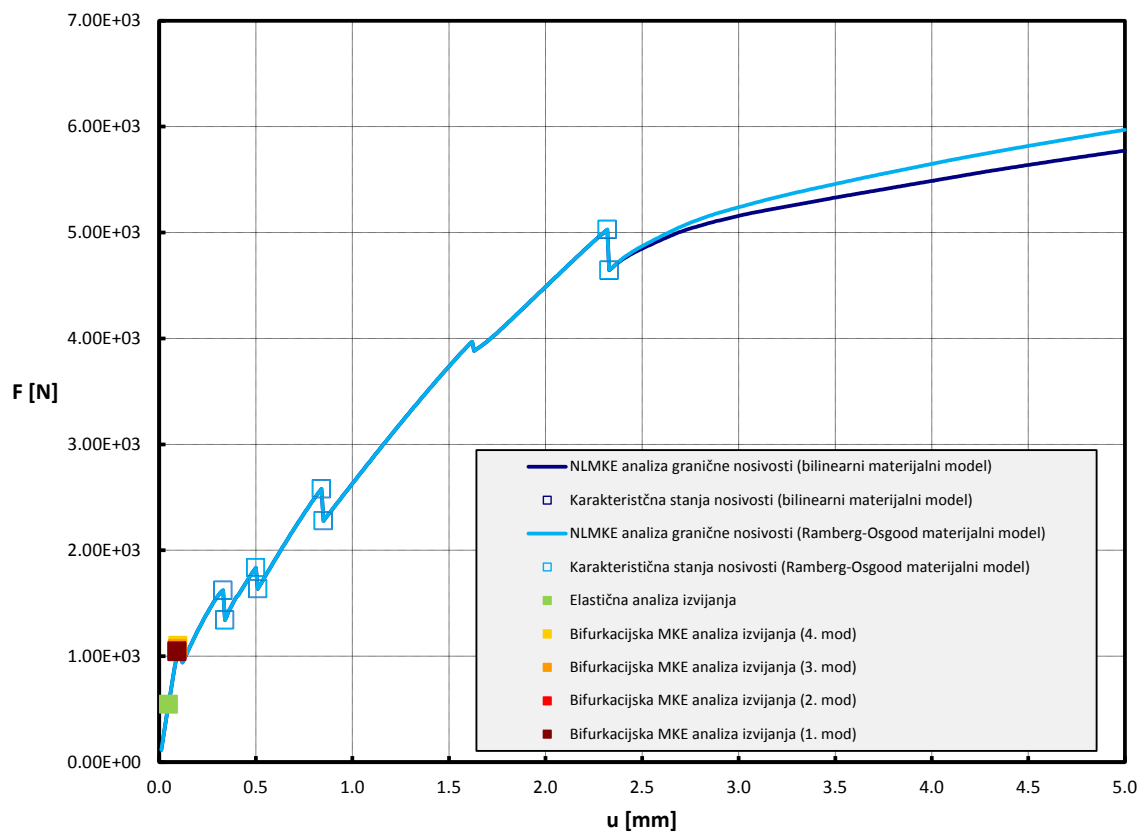
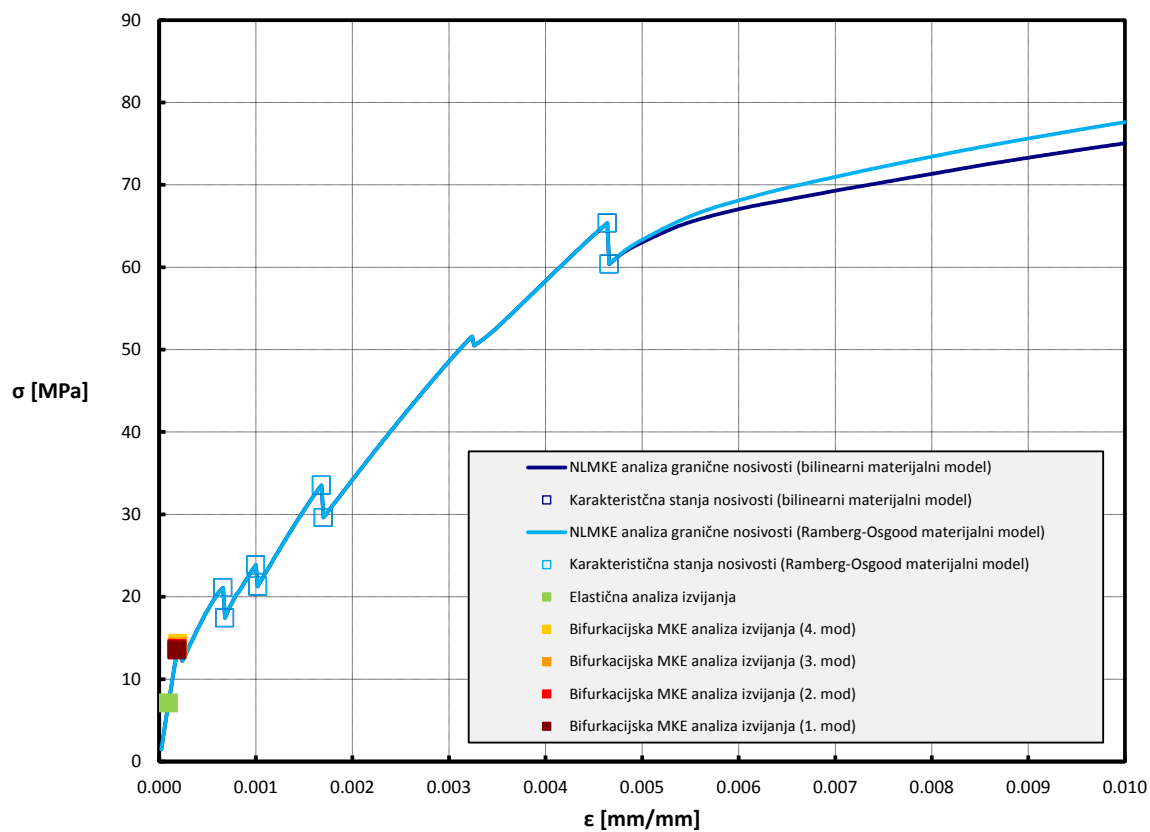
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 75.04	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.010000	-
$F_{U2}$	= 5772.49	N
$u_{U2}$	= 5.00	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprežanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 21.0919	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.010000	-
$F_{U3}$	= 5969.46	N
$u_{U3}$	= 5.00	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprežanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 60. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR325-T050-R1750 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:

**Tablica 61. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR325-T200-R2875.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 153.846	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 2.00	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 307.69	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 3.25	-	$r$	= 2875	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 16	-	$b^e$	= 9.615	mm
$N^e$	= 800 (Ukupni broj SS: 5202)		$\alpha^e$	= 1.04	-

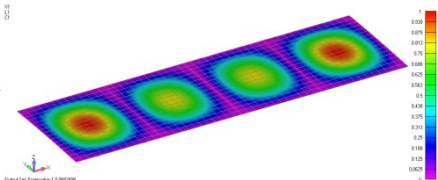
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 54.90	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 16892.29	N
$\varepsilon_E$	= 0.000744	-	$u_E$	= 0.37	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.0682498$  ;  $m = 4$ )

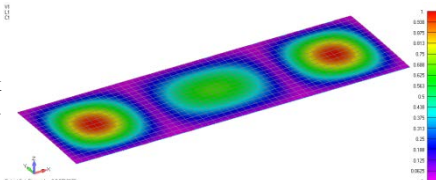
$\sigma_{E1}$	= 50.35	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000682	-
$F_{E1}$	= 15492.46	N
$u_{E1}$	= 0.34	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.0713173$  ;  $m = 3$ )

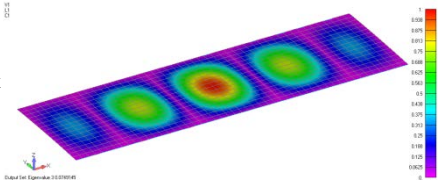
$\sigma_{E2}$	= 52.61	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000713	-
$F_{E2}$	= 16188.77	N
$u_{E2}$	= 0.36	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.0749145$  ;  $m = 5$ )

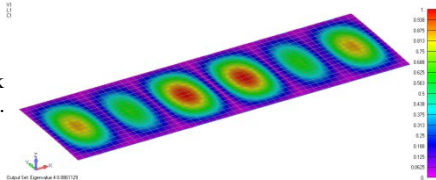
$\sigma_{E3}$	= 55.27	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000749	-
$F_{E3}$	= 17005.33	N
$u_{E3}$	= 0.37	mm

Treći oblik izvijanja.

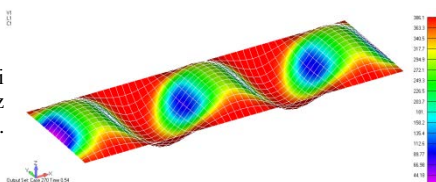
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.0861129$  ;  $m = 6$ )

$\sigma_{E4}$	= 63.53	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000861	-
$F_{E4}$	= 19547.32	N
$u_{E4}$	= 0.43	mm

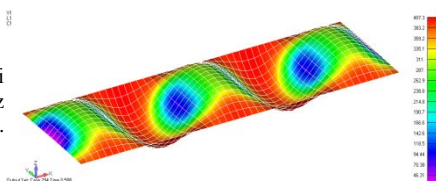
Četvrti oblik izvijanja.

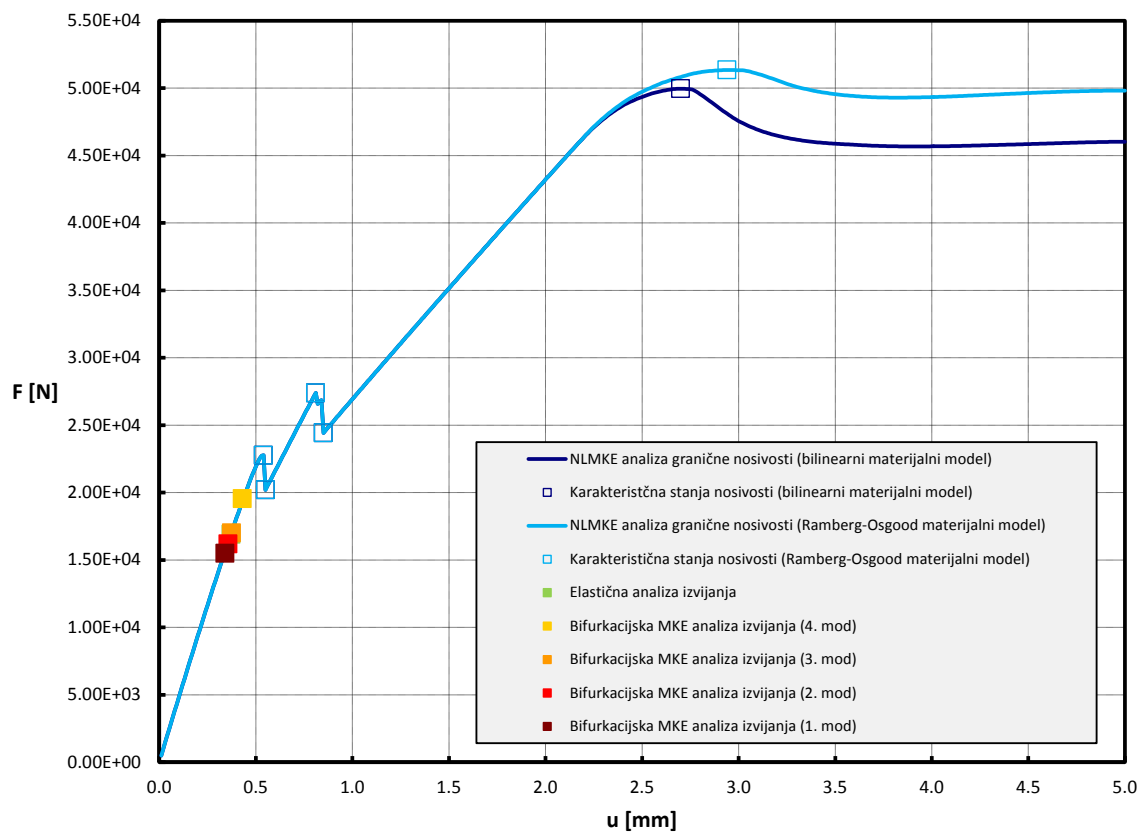
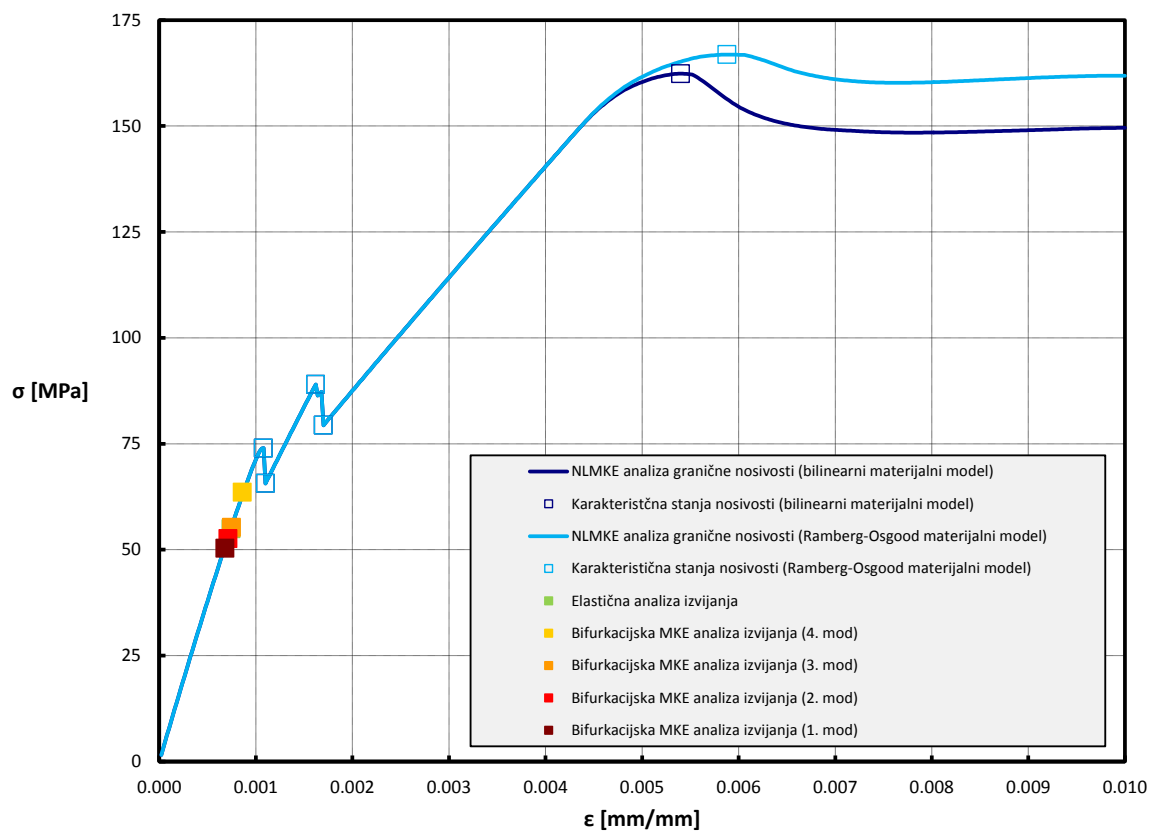
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 162.34	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.005400	-
$F_{U2}$	= 49951.38	N
$u_{U2}$	= 2.70	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 166.86	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.005880	-
$F_{U3}$	= 51342.83	N
$u_{U3}$	= 2.94	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 62. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR325-T200-R2875 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\epsilon$  i F-u dijagrama:

**Tablica 63. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR325-T500-R2875.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 153.846	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 5.00	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 769.23	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 3.25	-	$r$	= 2875	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 16	-	$b^e$	= 9.615	mm
$N^e$	= 800 (Ukupni broj SS: 5202)		$\alpha^e$	= 1.04	-

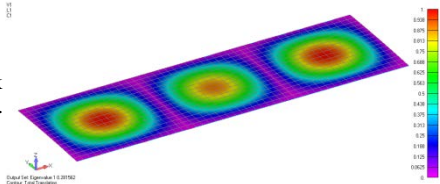
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 296.40	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 227999.77	N
$\varepsilon_E$	= 0.004018	-	$u_E$	= 2.01	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.281562$ ;  $m = 3$ )

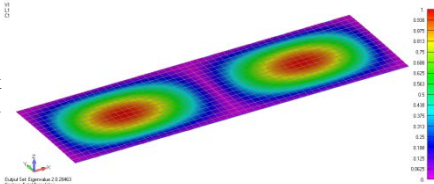
$\sigma_{E1}$	= 207.72	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.002816	-
$F_{E1}$	= 159783.94	N
$u_{E1}$	= 1.41	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.28463$ ;  $m = 2$ )

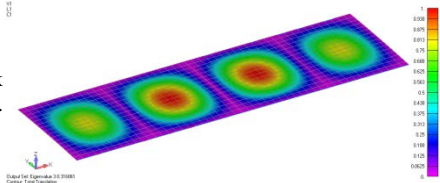
$\sigma_{E2}$	= 209.98	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.002846	-
$F_{E2}$	= 161525.00	N
$u_{E2}$	= 1.42	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.316861$ ;  $m = 4$ )

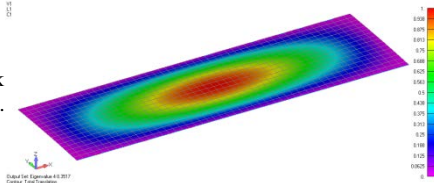
$\sigma_{E3}$	= 233.76	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.003169	-
$F_{E3}$	= 179815.81	N
$u_{E3}$	= 1.58	mm

Treći oblik izvijanja.

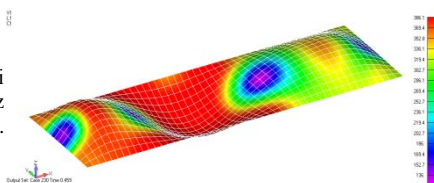
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.3517$ ;  $m = 1$ )

$\sigma_{E4}$	= 259.46	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.003517	-
$F_{E4}$	= 199586.63	N
$u_{E4}$	= 1.76	mm

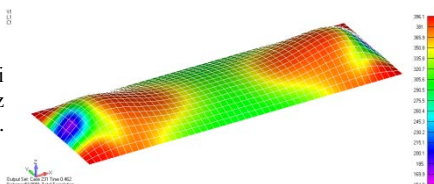
Četvrti oblik izvijanja.

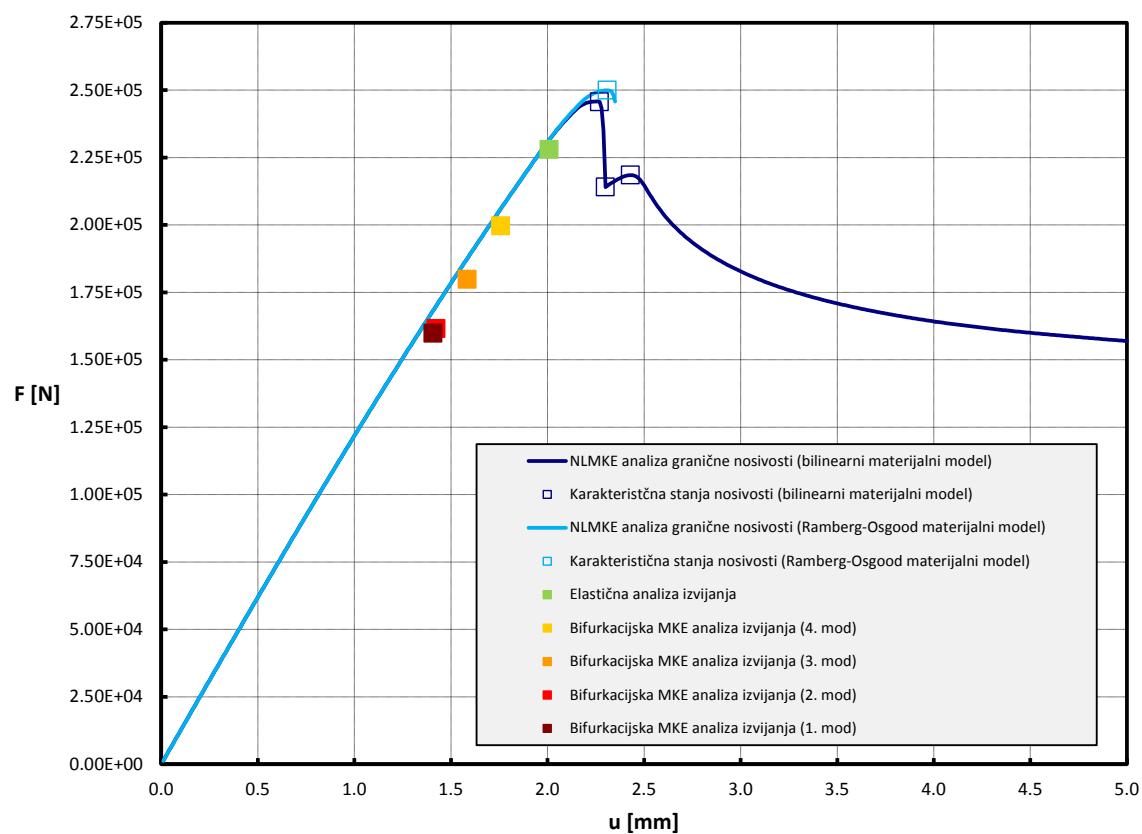
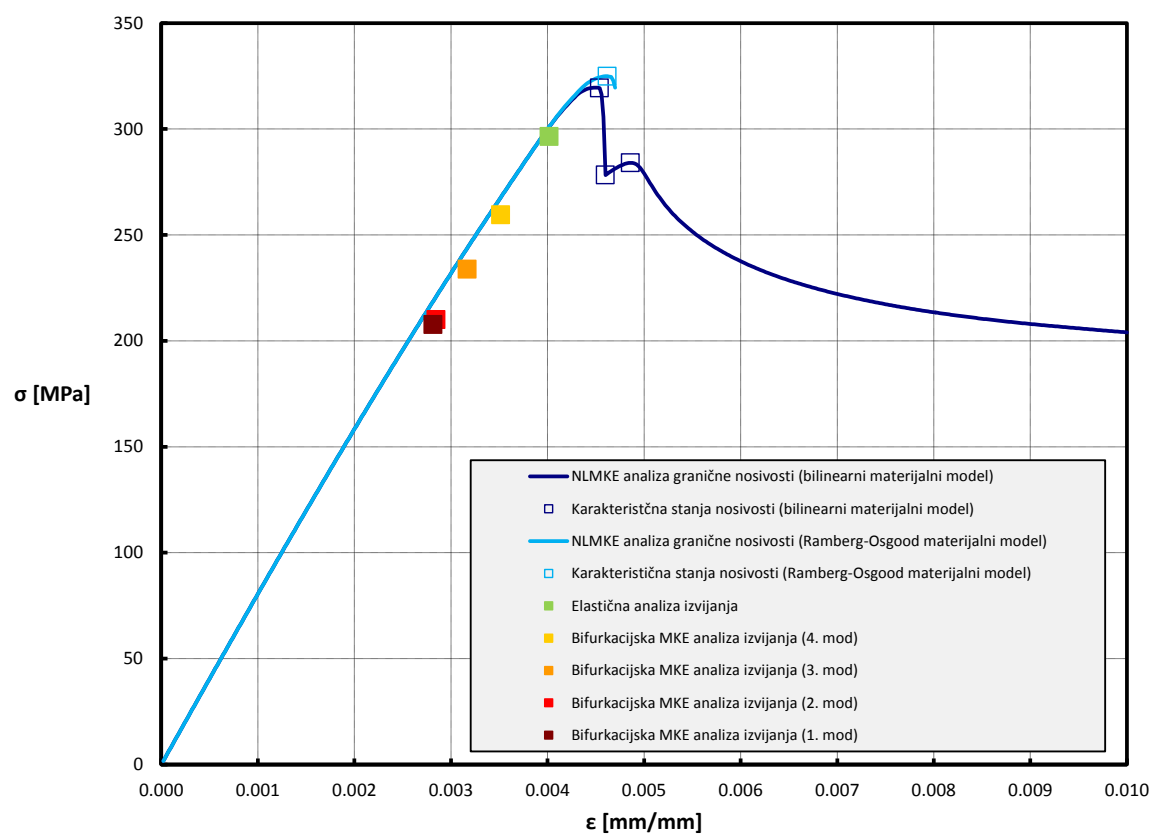
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 319.53	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.004520	-
$F_{U2}$	= 245793.55	N
$u_{U2}$	= 2.26	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM napreznja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 324.91	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.004620	-
$F_{U3}$	= 249930.91	N
$u_{U3}$	= 2.31	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM napreznja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 64. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR325-T500-R2875 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\epsilon$  i F-u dijagrama:

**Tablica 65. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR400-T050-R3250.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 125	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 0.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 62.50	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 4.00	-	$r$	= 3250	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

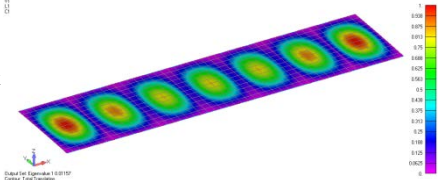
$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 12	-	$b^e$	= 10.417	mm
$N^e$	= 600 (Ukupni broj SS: 3978)		$\alpha^e$	= 1.04	-

**Elastična analiza izvijanja:**

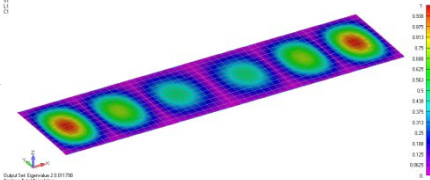
$\sigma_E$	= 6.70	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 418.75	N
$\varepsilon_E$	= 0.000091	-	$u_E$	= 0.05	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.01157$ ;  $m = 7$ )

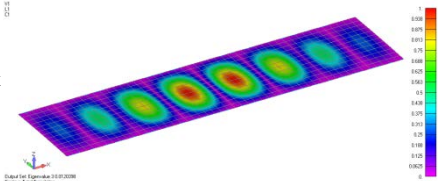
$\sigma_{E1}$	= 8.54	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.000116	-
$F_{E1}$	= 533.48	N
$u_{E1}$	= 0.06	mm

Prvi oblik  
izvijanja.2. način izvijanja ( $\lambda = 0.011798$ ;  $m = 6$ )

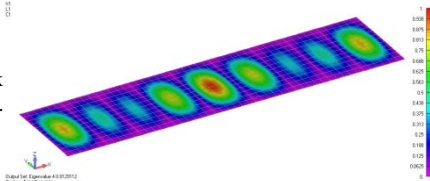
$\sigma_{E2}$	= 8.70	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.000118	-
$F_{E2}$	= 543.99	N
$u_{E2}$	= 0.06	mm

Drugi oblik  
izvijanja.3. način izvijanja ( $\lambda = 0.0120398$ ;  $m = 8$ )

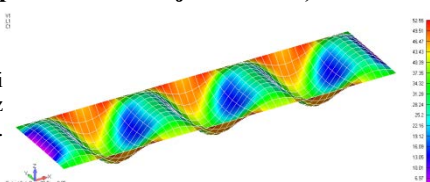
$\sigma_{E3}$	= 8.88	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.000120	-
$F_{E3}$	= 555.14	N
$u_{E3}$	= 0.06	mm

Treći oblik  
izvijanja.4. način izvijanja ( $\lambda = 0.0129112$ ;  $m = 9$ )

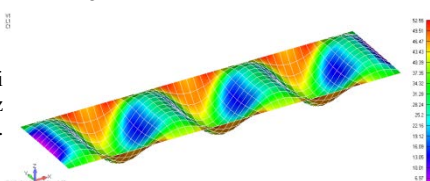
$\sigma_{E4}$	= 9.53	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.000129	-
$F_{E4}$	= 595.32	N
$u_{E4}$	= 0.06	mm

Četvrti oblik  
izvijanja.**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

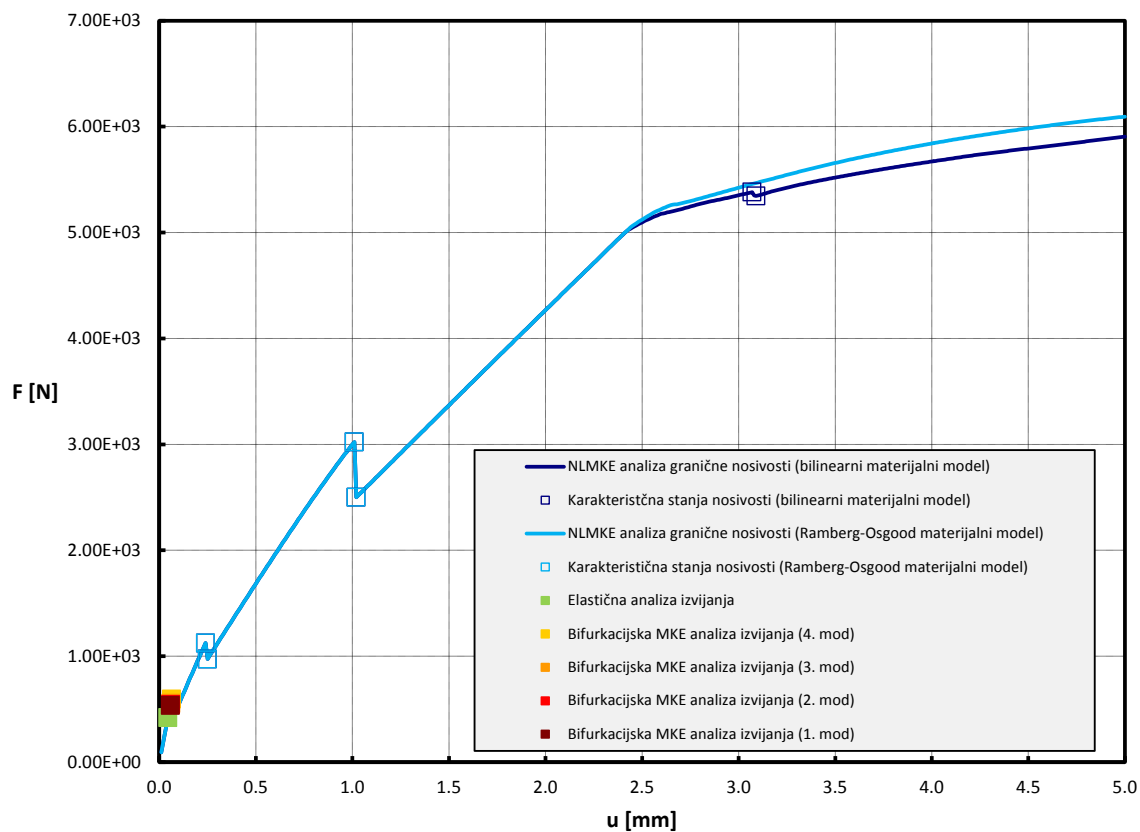
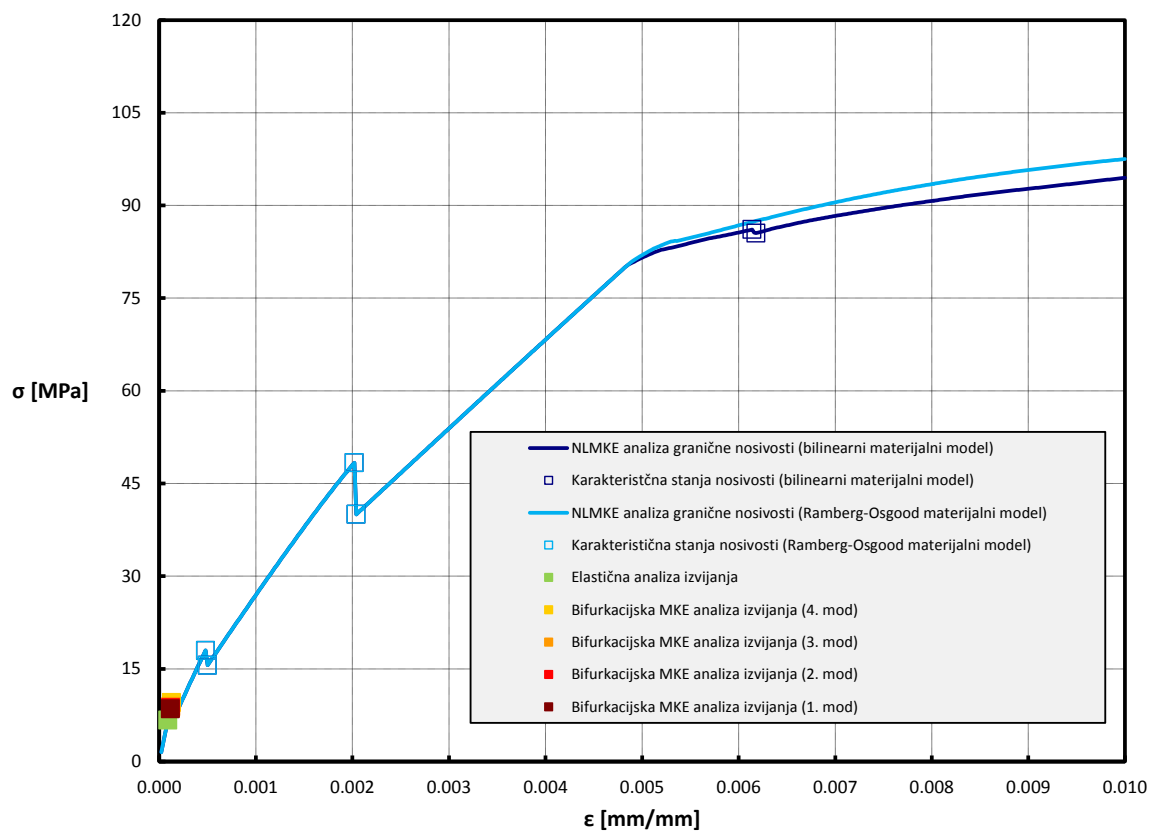
$\sigma_{U2}$	= 94.48	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.010000	-
$F_{U2}$	= 5904.83	N
$u_{U2}$	= 5.00	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 17.9786	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.010000	-
$F_{U3}$	= 6094.15	N
$u_{U3}$	= 5.00	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).



**Tablica 66. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR400-T050-R3250 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:



**Tablica 67. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR400-T350-R1750.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 125	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 3.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 437.50	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 4.00	-	$r$	= 1750	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 12	-	$b^e$	= 10.417	mm
$N^e$	= 600 (Ukupni broj SS: 3978)		$\alpha^e$	= 1.04	-

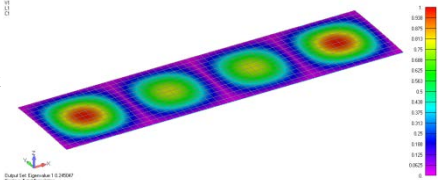
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 232.90	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 101893.75	N
$\varepsilon_E$	= 0.003157	-	$u_E$	= 1.58	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.245047$ ;  $m = 4$ )

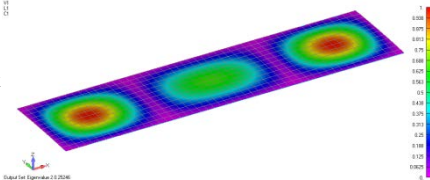
$\sigma_{E1}$	= 180.78	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.002450	-
$F_{E1}$	= 79091.59	N
$u_{E1}$	= 1.23	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.25246$ ;  $m = 3$ )

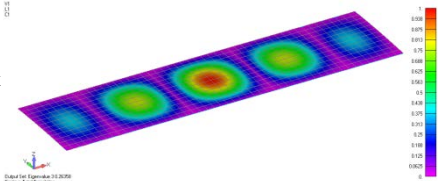
$\sigma_{E2}$	= 186.25	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.002525	-
$F_{E2}$	= 81484.22	N
$u_{E2}$	= 1.26	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.26358$ ;  $m = 5$ )

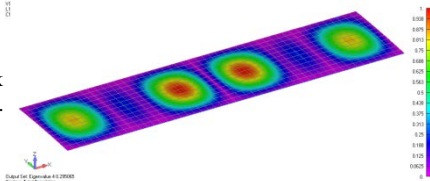
$\sigma_{E3}$	= 194.45	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.002636	-
$F_{E3}$	= 85073.32	N
$u_{E3}$	= 1.32	mm

Treći oblik izvijanja.

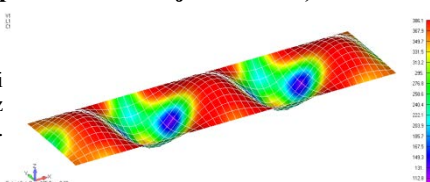
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.295065$ ;  $m = 6$ )

$\sigma_{E4}$	= 217.68	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.002951	-
$F_{E4}$	= 95235.44	N
$u_{E4}$	= 1.48	mm

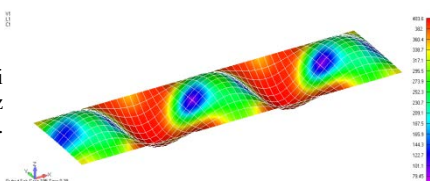
Četvrti oblik izvijanja.

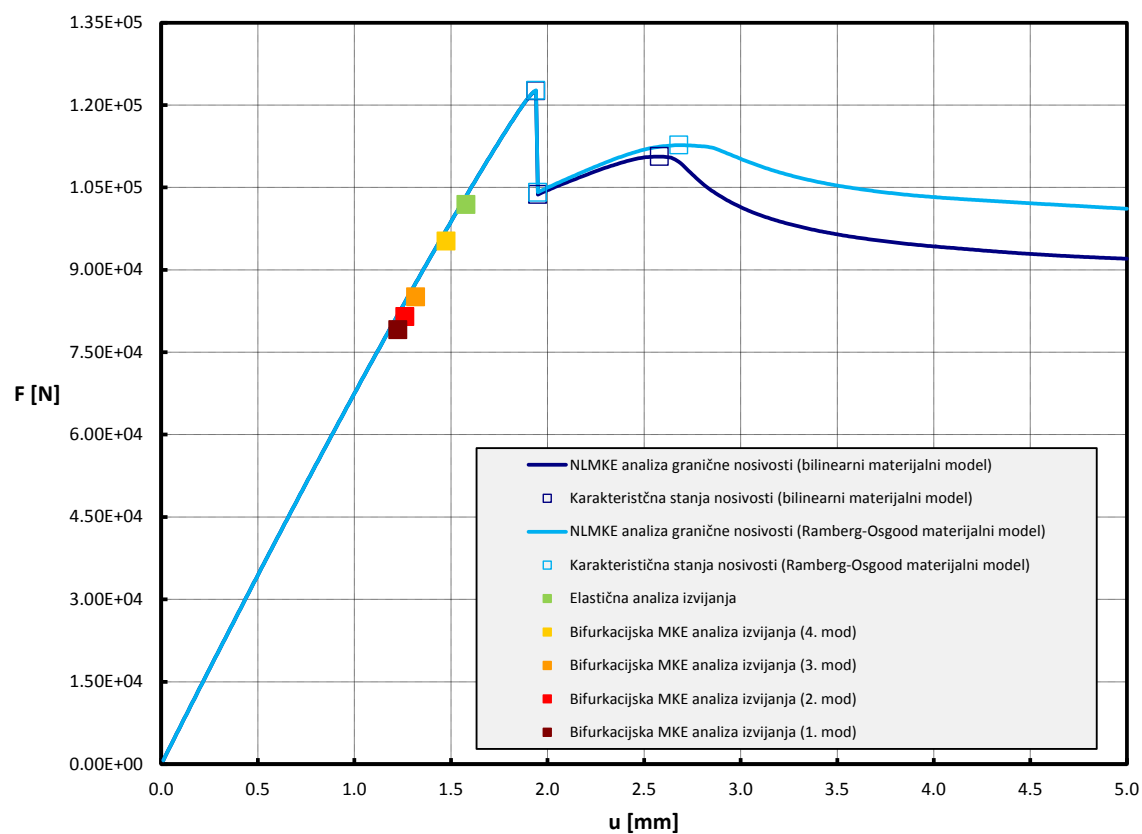
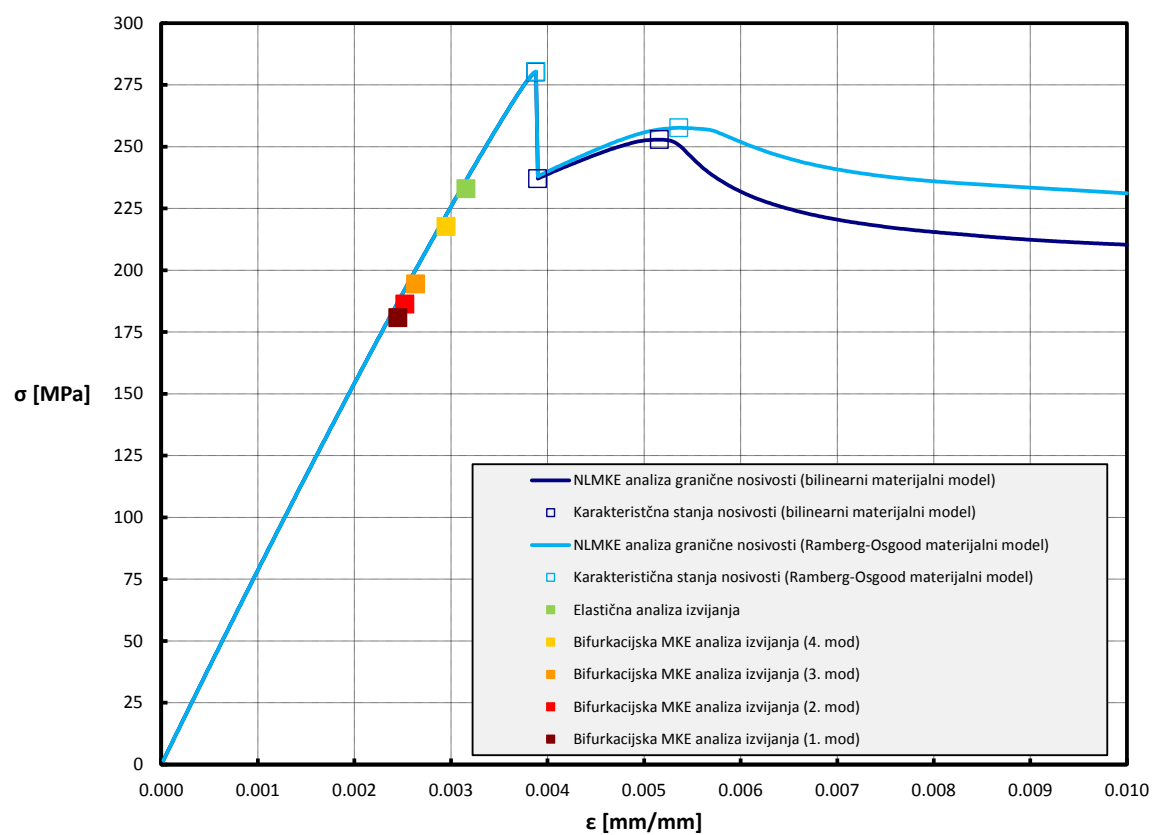
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 280.14	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.003880	-
$F_{U2}$	= 122561.38	N
$u_{U2}$	= 1.94	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 280.41	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.003880	-
$F_{U3}$	= 122678.32	N
$u_{U3}$	= 1.94	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 68. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR400-T350-R1750 (nastavak).****Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

**Tablica 69. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR400-T350-R2500.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 125	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 3.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 437.50	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 4.00	-	$r$	= 2500	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

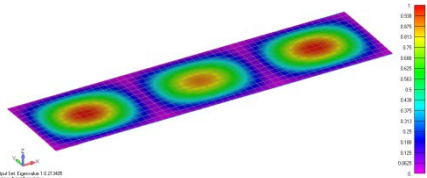
$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 12	-	$b^e$	= 10.417	mm
$N^e$	= 600 (Ukupni broj SS: 3978)		$\alpha^e$	= 1.04	-

**Elastična analiza izvijanja:**

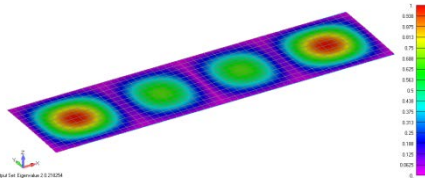
$\sigma_E$	= 222.00	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 97125.00	N
$\varepsilon_E$	= 0.003009	-	$u_E$	= 1.50	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.213405$ ;  $m = 3$ )

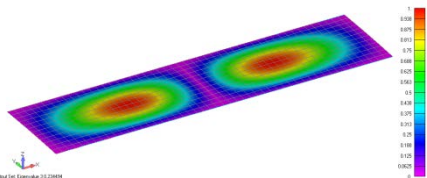
$\sigma_{E1}$	= 157.44	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.002134	-
$F_{E1}$	= 68878.79	N
$u_{E1}$	= 1.07	mm

Prvi oblik  
izvijanja.2. način izvijanja ( $\lambda = 0.218254$ ;  $m = 4$ )

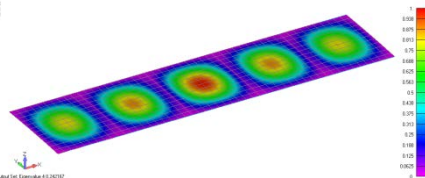
$\sigma_{E2}$	= 161.23	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.002185	-
$F_{E2}$	= 70536.17	N
$u_{E2}$	= 1.09	mm

Drugi oblik  
izvijanja.3. način izvijanja ( $\lambda = 0.234494$ ;  $m = 2$ )

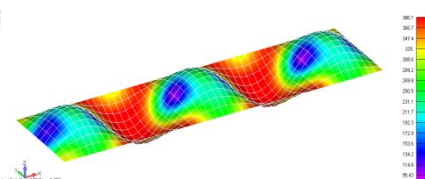
$\sigma_{E3}$	= 173.00	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.002345	-
$F_{E3}$	= 75685.49	N
$u_{E3}$	= 1.17	mm

Treći oblik  
izvijanja.4. način izvijanja ( $\lambda = 0.242167$ ;  $m = 5$ )

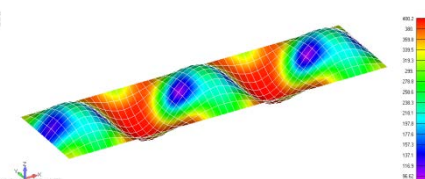
$\sigma_{E4}$	= 178.66	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.002422	-
$F_{E4}$	= 78162.04	N
$u_{E4}$	= 1.21	mm

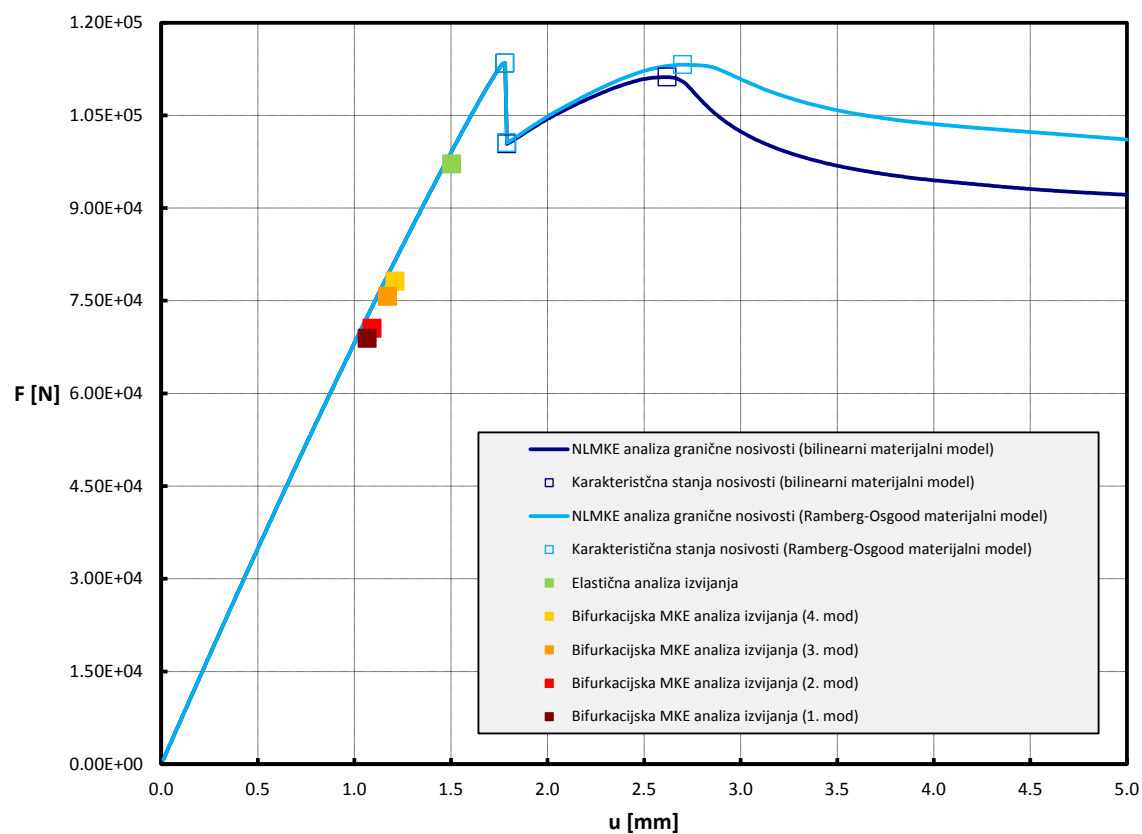
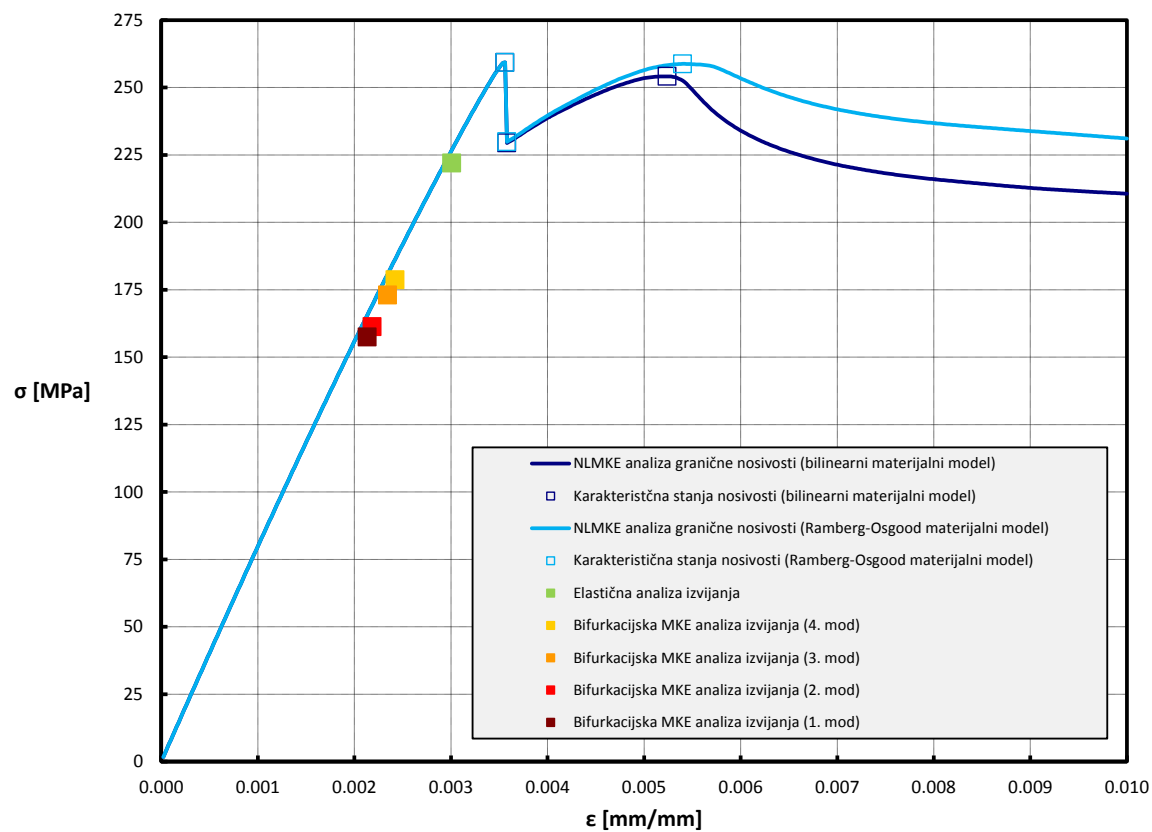
Četvrti oblik  
izvijanja.**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 259.28	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.003560	-
$F_{U2}$	= 113436.90	N
$u_{U2}$	= 1.78	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 259.28	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.003560	-
$F_{U3}$	= 113436.90	N
$u_{U3}$	= 1.78	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 70. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR400-T350-R2500 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\epsilon$  i F-u dijagrama:

**Tablica 71. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR400-T650-R1750.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 125	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 6.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 812.50	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 4.00	-	$r$	= 1750	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 12	-	$b^e$	= 10.417	mm
$N^e$	= 600 (Ukupni broj SS: 3978)		$\alpha^e$	= 1.04	-

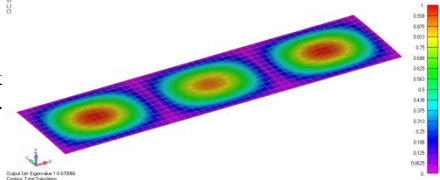
**Elastična analiza izvijanja:**

$\sigma_E$	= 745.10	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 605393.75	N
$\varepsilon_E$	= 10189419.94	-	$u_E$	= 5094709968.94	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.670066$  ;  $m = 3$ )

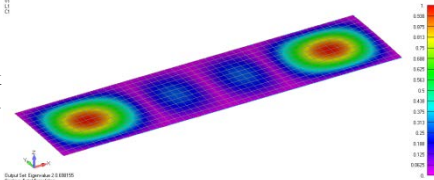
$\sigma_{E1}$	= 494.33	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.006701	-
$F_{E1}$	= 401646.34	N
$u_{E1}$	= 3.35	mm

Prvi oblik izvijanja.

2. način izvijanja ( $\lambda = 0.698155$ ;  $m = 4$ )

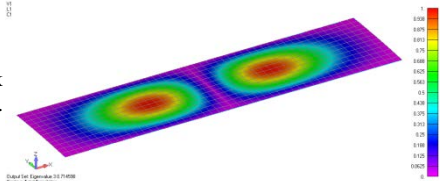
$\sigma_{E2}$	= 515.06	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.006982	-
$F_{E2}$	= 418483.25	N
$u_{E2}$	= 3.49	mm

Drugi oblik izvijanja.

3. način izvijanja ( $\lambda = 0.714598$  ;  $m = 2$ )

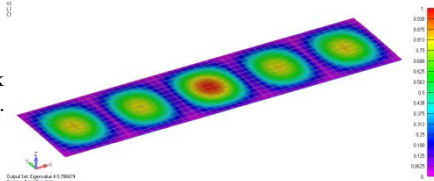
$\sigma_{E3}$	= 527.19	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.007146	-
$F_{E3}$	= 428339.40	N
$u_{E3}$	= 3.57	mm

Treći oblik izvijanja.

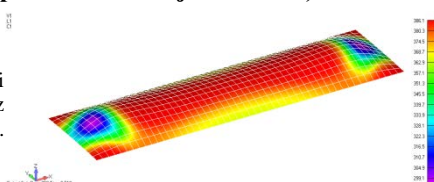
4. način izvijanja ( $\lambda = 0.786674$  ;  $m = 5$ )

$\sigma_{E4}$	= 580.36	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.007867	-
$F_{E4}$	= 471542.70	N
$u_{E4}$	= 3.93	mm

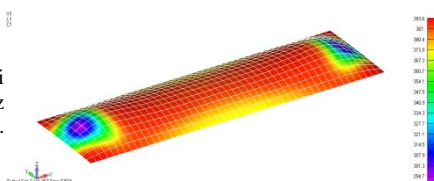
Četvrti oblik izvijanja.

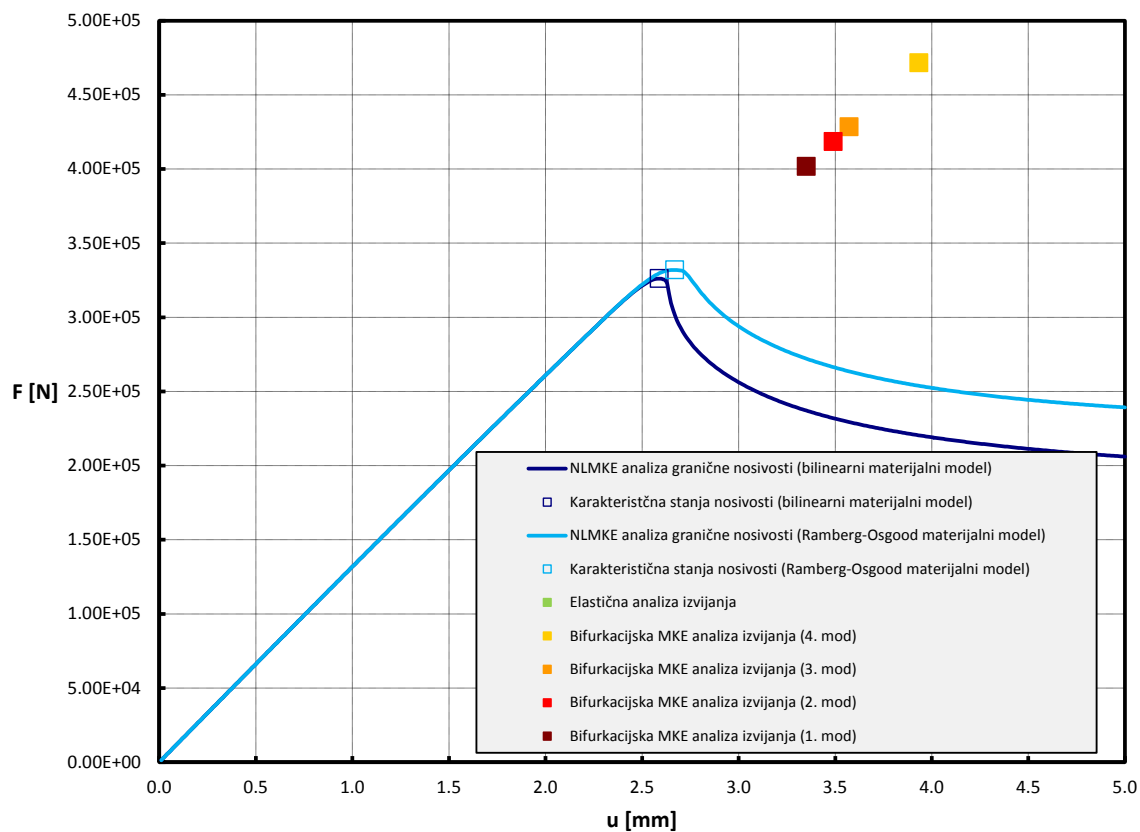
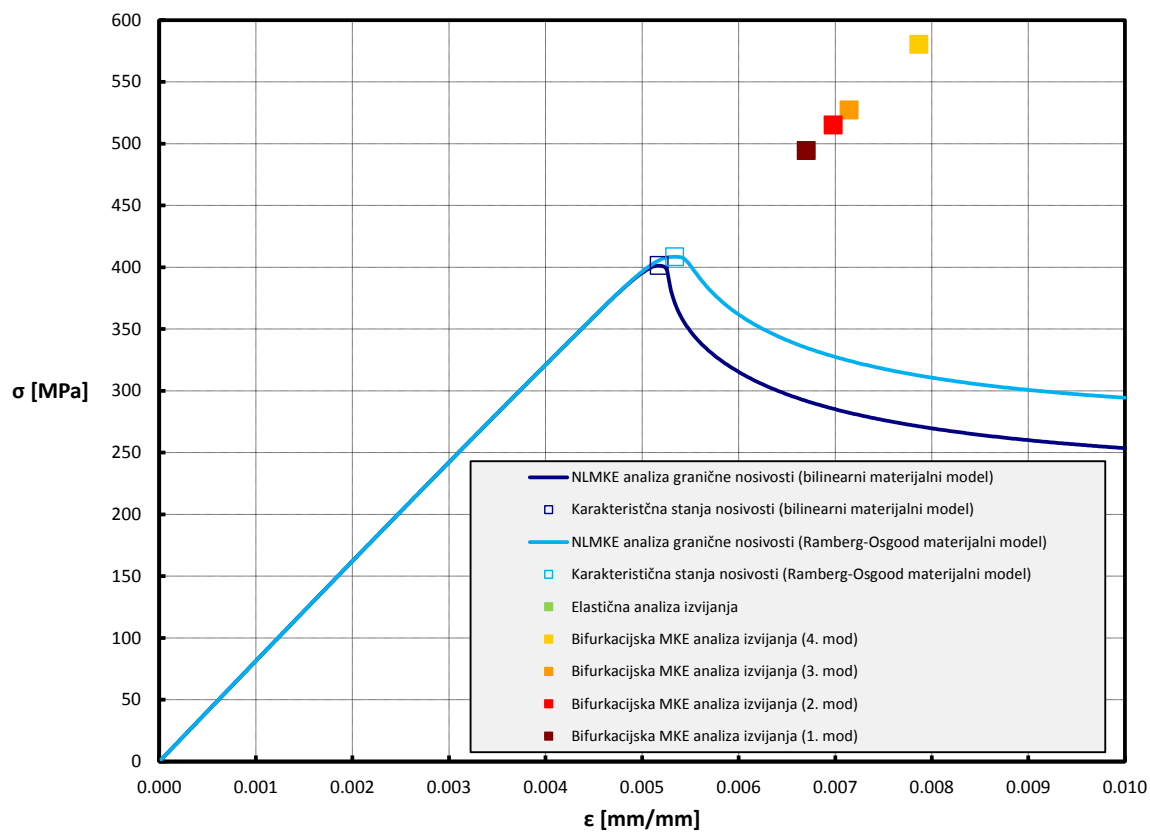
**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

$\sigma_{U2}$	= 401.33	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.005180	-
$F_{U2}$	= 326082.20	N
$u_{U2}$	= 2.59	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 408.45	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.005340	-
$F_{U3}$	= 331868.97	N
$u_{U3}$	= 2.67	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).

**Tablica 72. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR400-T650-R1750 (nastavak).****Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:**

**Tablica 73. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR400-T650-R3250.****Geometrijske i materijalne karakteristike:**

$a$	= 500	mm	$E$	= 73773.92	N/mm <sup>2</sup>
$b$	= 125	mm	$\nu_e$	= 0.33	-
$t$	= 6.50	mm	$\sigma_{0.2Y}$	= 386.11	N/mm <sup>2</sup>
$A$	= 812.50	mm <sup>2</sup>	$n_{RO}$	= 34	-
$\alpha$	= 4.00	-	$r$	= 3250	mm

**Karakteristike diskretiziranog modela za MKE analize:**

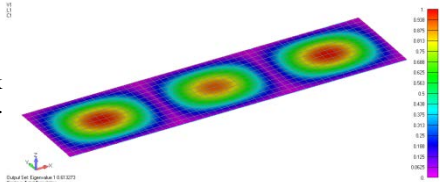
$N_a^e$	= 50	-	$a^e$	= 10	mm
$N_b^e$	= 12	-	$b^e$	= 10.417	mm
$N^e$	= 600 (Ukupni broj SS: 3978)		$\alpha^e$	= 1.04	-

**Elastična analiza izvijanja:**

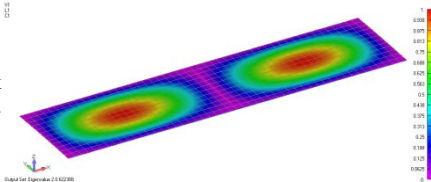
$\sigma_E$	= 713.40	N/mm <sup>2</sup>	$F_E$	= 579637.50	N
$\varepsilon_E$	= 2323699.033	-	$u_E$	= 1161849516.30	mm

**Bifurkacijska (elastična) MKE analiza izvijanja (analiza vlastitih vrijednosti vektora opterećenja):**1. način izvijanja ( $\lambda = 0.613273$  ;  $m = 3$ )

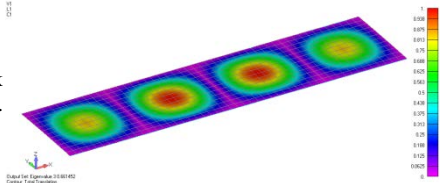
$\sigma_{E1}$	= 452.44	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E1}$	= 0.006133	-
$F_{E1}$	= 367603.87	N
$u_{E1}$	= 3.07	mm

Prvi oblik  
izvijanja.2. način izvijanja ( $\lambda = 0.622388$  ;  $m = 2$ )

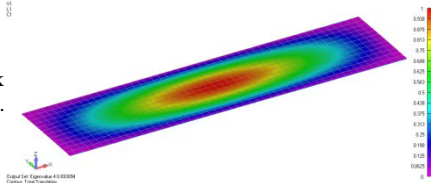
$\sigma_{E2}$	= 459.16	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E2}$	= 0.006224	-
$F_{E2}$	= 373067.52	N
$u_{E2}$	= 3.11	mm

Drugi oblik  
izvijanja.3. način izvijanja ( $\lambda = 0.661452$  ;  $m = 4$ )

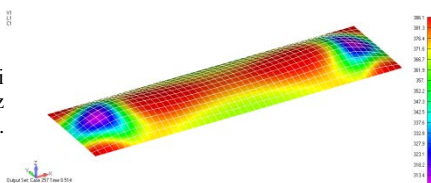
$\sigma_{E3}$	= 487.98	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E3}$	= 0.006615	-
$F_{E3}$	= 396482.99	N
$u_{E3}$	= 3.31	mm

Treći oblik  
izvijanja.4. način izvijanja ( $\lambda = 0.693094$  ;  $m = 1$ )

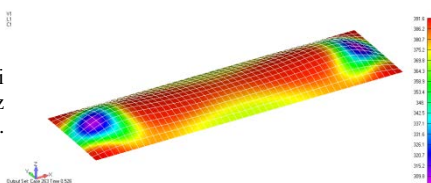
$\sigma_{E4}$	= 511.32	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{E4}$	= 0.006931	-
$F_{E4}$	= 415449.62	N
$u_{E4}$	= 3.47	mm

Četvrti oblik  
izvijanja.**Granična nosivost određena NLMKE analizom (bilinearni elasto-plastični materijalni model):**

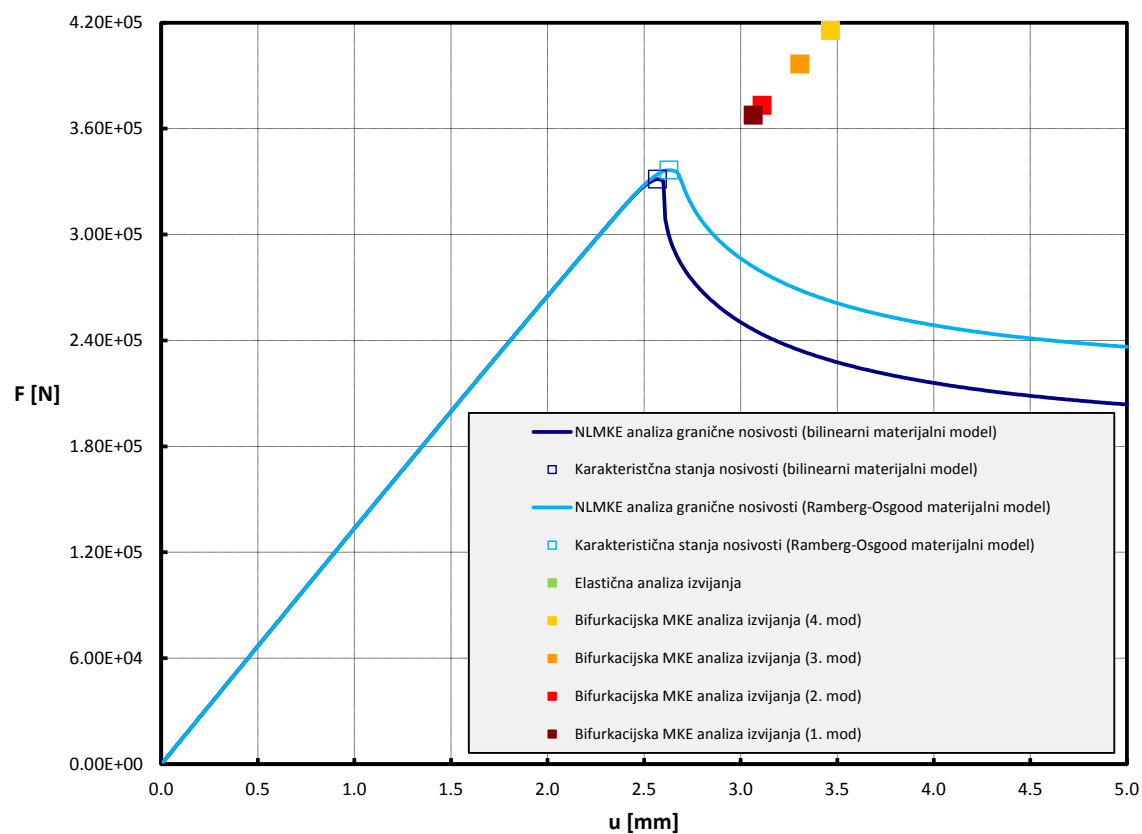
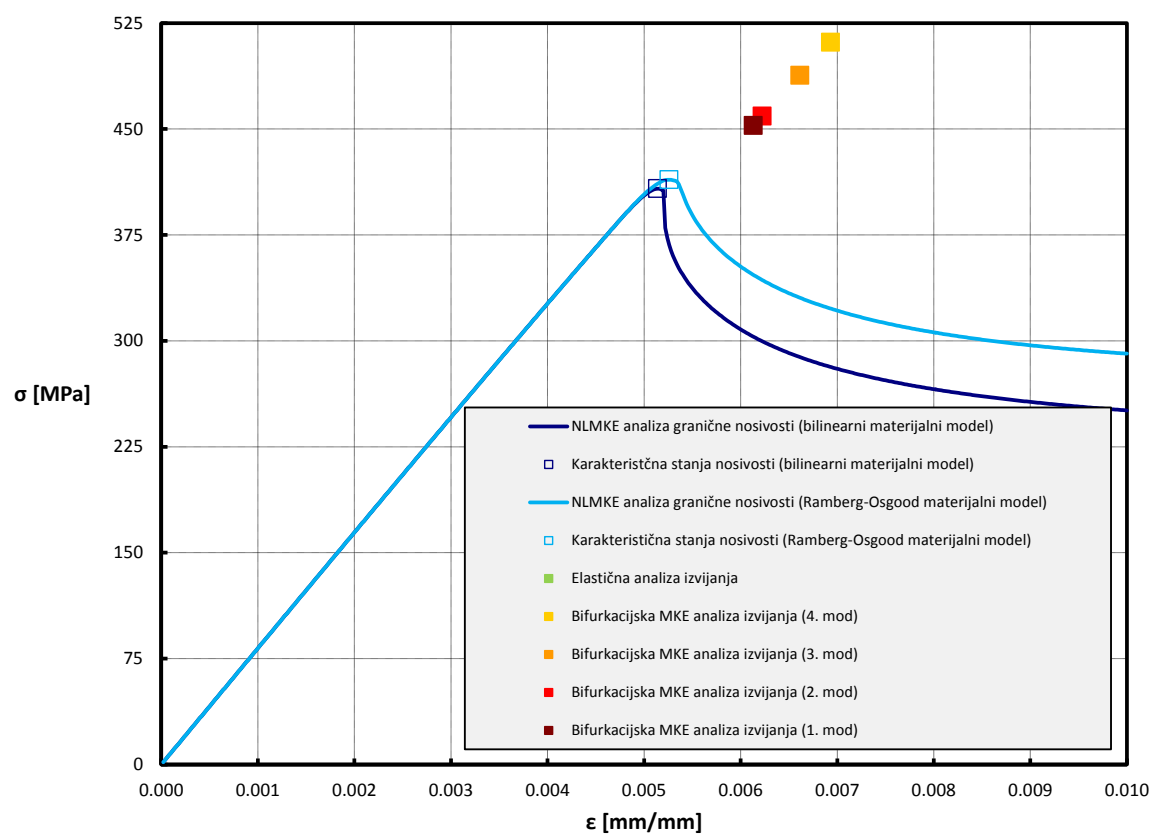
$\sigma_{U2}$	= 407.76	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U2}$	= 0.005140	-
$F_{U2}$	= 331307.78	N
$u_{U2}$	= 2.57	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).**Granična nosivost određena NLMKE analizom (Ramberg-Osgood materijalni model):**

$\sigma_{U3}$	= 414.05	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{U3}$	= 0.005260	-
$F_{U3}$	= 336418.98	N
$u_{U3}$	= 2.63	mm

Stanje granične nosivosti  
(karikirani deformirani oblik uz  
prikaz VM naprezanja u N/mm<sup>2</sup>).



**Tablica 74. Karakteristike i rezultati za panel oznake CP-AR400-T650-R3250 (nastavak).**Prikaz dobivenih rezultata unutar  $\sigma$ - $\varepsilon$  i F-u dijagrama:



## LITERATURA

- [1] FEMAP/NX Nastran. Software documentation. Siemens Product Lifecycle Management Software, 2010.
- [2] DESIGN EXPERT. Software documaentation. Stat-Ease, Inc, 2010.
- [3] <http://www.aluminum.org/Content/NavigationMenu/TheIndustry/SheetPlate/>
- [4] Starke, E. A. Jr, Staley, J. T., Application of modern aluminum alloys to aircraft, Elsevier science Ltd, 1995.
- [5] Ćorić, D., Filetin, T. Materijali u zrakoplovstvu, Fakultet strojarstva i brodogranje, Zagreb, 2012.
- [6] MIL-HBK-5J, Metallic materials and elemnts for aerospace vehicle structures, Department of defense handbook, 2003.
- [7] Paik, J. K., van der Veen, S., Duran, A., Collette M., Ultimate compressive strenght design methods of aluminum welded stiffened panel structures for aerospace, marine and land-based applications: A benchmark study, Elsevier, 2005
- [8] Gerard, G., Handbook of Structural Stability Part IV- Faliure of plates and composite elements NACA TN 3784, 1957.
- [9] Gerard, G., Becker, H. Handbook of Structural Stability Part I - Buckling of Flat Plates NACA TN 3781, 1957
- [10] Hughes, O.F., Paik, J.K. Ship structural analysis and design. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
- [11] Gerard, G., Becker, H. Handbook of Structural Stability Part III - Buckling of curved plates and shells NACA TN 3783, 1957
- [12] Abbott, R. AA-SM-006, Standard stress methods, Curved plate buckling, Revision A, Annex D, Abbott Aerospace, Inc., 2008.
- [13] Prebeg, P., Višekriterijsko projektiranje složenih tankostjenih konstrukcija, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.
- [14] Niu, M. C. Y., Airframe structural design, Technical Book Company, California, 1988.
- [15] Hughes, O.F., Paik, J.K. Ship structural analysis and design. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.